

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉTECTION DE FUITE  
DANS LES BARRAGES EN REMBLAI  
PAR LA MÉTHODE DE POLARISATION SPONTANÉE ET  
PAR TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE : CAS DE LA JONCTION DE DEUX BARRAGES EN  
REMBLAI

LINDA ARMELLE NZUMOTCHA TCHOUMKAM  
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE MINÉRAL)  
DÉCEMBRE 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉTECTION DE FUITE  
DANS LES BARRAGES EN REMBLAI  
PAR LA MÉTHODE DE POLARISATION SPONTANÉE ET  
PAR TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE : CAS DE LA JONCTION DE DEUX BARRAGES EN  
REMBLAI

présenté par : Nzumotcha Tchoumkam Linda Armelle

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LÉGER Pierre, Ph.D., président

M. CHOUTEAU Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. GIROUX Bernard, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. ROY Jean, Ph.D., membre

## DÉDICACE

"L'observation scientifique est toujours une observation polémique" (Gaston Bachelard)

À mes Parents

## REMERCIEMENTS

Je remercie vivement mon directeur de recherche, Michel Chouteau et mon co-directeur, Bernard Giroux, pour leur soutien tout au long de ma maîtrise. Ils ont toujours laissé ouvertes leurs portes pendant mes périodes de questionnements. Je les remercie aussi pour leur bonne humeur et leur attention, leur encouragement, leurs commentaires et critiques pendant la rédaction de mon mémoire, l'écriture des articles soumis lors du SAGEEP 2010 et au NDTMS 2011 et pour la présentation des conférences effectuées à l'occasion du symposium de la SAGEEP 2010 et lors de la WATER 2010.

Un merci particulier à mon co-directeur qui m'a fait confiance et m'a proposé le projet pour ma maîtrise. Un autre merci particulier à mon directeur pour la confiance qu'il m'a accordée pour les diverses tâches confiées. Je tiens tout aussi à remercier les membres du jury qui ont accepté d'examiner mon mémoire.

Je remercie Hydro-Québec détenteur du mandat qui a servi à financer ma maîtrise. Un merci à Marc Smith, pour son étroite collaboration. Je remercie particulièrement Kaveh Saleh et Alain Côté pour leurs conseils et soutien.

Je remercie aussi la délégation de l'université de Sherbrooke : Professeur Patrice Rivard, grâce à qui s'est réalisée dans le cadre de ce projet la collaboration entre Hydro-Québec, l'Université de Sherbrooke et l'École Polytechnique. Je tiens tout aussi à le remercier pour ses commentaires pertinents et pour son soutien pendant toute cette période; Je suis aussi reconnaissante envers Danick Charbonneau, pour son sens pratique, son aide et sa participation pendant toutes les journées de terrain; les étudiants qui ont participé à l'acquisition des données. Un autre merci s'adresse à Carole Kaouane pour son aide pendant l'acquisition des mesures.

## RÉSUMÉ

L'infiltration d'eau au travers du corps ou de la fondation des ouvrages en remblai est un problème qui peut devenir préoccupant. Le phénomène de l'infiltration de l'eau est évolutif et il peut mettre en péril la pérennité ou la stabilité de ces ouvrages et par conséquent la sécurité du public. Des statistiques basées sur 11 192 barrages en remblai à travers le monde ont montré que 48% des ruptures (jusqu'à 1986) ont eu pour cause des phénomènes d'érosion interne. L'infiltration de l'eau à travers le noyau ou la fondation des ouvrages en remblai causant ces phénomènes d'érosion interne, est engendrée par la présence de renard, par le mécanisme de suffusion et d'autres mécanismes. Les méthodes électriques, l'électromagnétisme et la thermométrie sont jugées comme les techniques les plus prometteuses de détection des infiltrations d'eau dans les barrages en remblai ou leurs fondations.

Le but principal de ce mémoire est d'étudier la sensibilité de la méthode de polarisation spontanée (P.S.) pour détecter les infiltrations d'eau dans le cas de barrages en remblai. À cet effet, nous avons utilisé de deux méthodes électriques, la méthode de polarisation spontanée et la tomographie de résistivité électrique. Nous avons acquis les données de polarisation spontanée et de résistivité électrique avec des changements périodiques et progressifs du niveau de l'eau dans le réservoir. Ces changements du niveau de l'eau avaient lieu à chaque automne (au mois de novembre) et à chaque printemps (au mois d'avril) respectivement pendant la vidange et la mise en eau du réservoir. Dans le cadre de ce mémoire, l'acquisition des mesures de terrain s'est étalée sur deux années (2008-2010). Précédemment, des études (thermométrie, potentiel spontané, électrique, magnétisme) avaient été effectuées sur le site afin d'apporter une interprétation sur la direction de l'écoulement de l'eau et la position approximative de la fuite où a lieu l'infiltration. Parallèlement aux mesures géophysiques, le débit de fuite d'eau sur le site était mesuré à chacune des campagnes de terrain. En avril 2010, une opération d'injection de coulis a eu lieu sur le site. Des données de terrain, ressortent une représentation temporelle du potentiel et un suivi temporel de la résistivité électrique. Ceci a permis de faire une distinction entre les sources possibles du potentiel. Les résultats de polarisation spontanée mettent en évidence une anomalie négative qui corrèle spatialement avec la zone de suintement visible sur le site. Ces résultats ont aussi permis de dissocier la zone d'anomalie influencée par l'opération d'injection de coulis. Le gradient du

potentiel observé décroît avec l'augmentation du gradient hydraulique. À partir de la variation du potentiel avec le niveau de l'eau, nous avons proposé une gamme de valeurs du coefficient de couplage effectif des matériaux du barrage. Le suivi temporel de la résistivité électrique est utilisé pour contrôler la variation de la conductivité électrique avec le changement du niveau de l'eau. Il présente une zone d'anomalie localisée à proximité du suintement visible.

Le calcul de la réponse de polarisation spontanée avec le changement du niveau de l'eau dans le réservoir, est également faite sur un modèle numérique en 3D. Les données initiales du modèle sont acquises des mesures de terrain et des résultats des études précédentes.

En comparant les résultats de modélisation et les mesures de terrain, on note que les réponses sont différentes et les explications possibles de ces différences sont nombreuses. Elles nécessiteraient pour y répondre des travaux plus poussés aussi bien sur la stratégie de mesure que sur l'estimation des coefficients de couplage. Par ailleurs, le suivi temporel des mesures de polarisation spontanée et de résistivité a permis de mettre en évidence des variations dans le sol et d'émettre des limitations possibles de la sensibilité de la méthode de polarisation spontanée appliquée à la détection des infiltrations d'eau.

## ABSTRACT

The infiltration through the core of foundation of embankment dams is a problem which is worrying for safety and economical dams. The mechanism of infiltration can be progressive and can disturb the stability or the durability of the structures. Consequently, its evolution can undermine public security. Statistics made for 11192 embankment dams through the world showed that until 1986, 48% of damages have been caused by internal erosion. This internal erosion was generated by infiltration through the core or the foundation of embankment dam. Electrical, electromagnetic and thermometric methods are usually considered as investigation methods.

The goal of this work is to study the sensibility of the self-potential method (S.P.) to detect seepage for the case of embankment dams. We used S.P jointly with electrical resistance tomography (ERT). To attain this objective, we acquired self-potential and resistivity data with periodic changes of the water level in the reservoir. These changes were made every spring (in November) and every summer (in April) at the emptying and impounding of the reservoir. For this project, measures have been conducted over a period of two years (2008-2010). Before that, thermometry, self-potential and magnetic methods were applied on the site to acquire information about seepage and its approximate position. Flow rate was also measured. In April 2010, injection of grout was used to clog seepage.

The measurements allowed to represent the variation of potential with time and space. That permitted to make a distinction between different sources of self-potential signal. The mapping of the electric potential during the emptying and the impounding of the reservoir showed a negative anomaly which correlate to an outflow located in the upstream of the dam. The monitoring of the S.P. signal permitted to dissociate an anomaly zone which can be related to the site of injection of grout. The gradient of self-potential decreased with the increase of pressure gradient. We have computed the effective electro kinetic (EK) coupling coefficient of the dam from the variation of the potential with water level. Time-lapse ERT is used to control the variation of electrical conductivity of the material together with changes in water level. The anomaly in the time-lapse

represented agrees with the outflow. We also propose a 3D numerical model to interpret the measurements in a semi-quantitative manner.

Comparing between results of modeling and the survey data, differences are noted that can be explained in different ways. More work would be needed to elucidate those differences, in particular with the measurement strategy and the estimation of coupling coefficients. Nevertheless, the proposed approach allowed to underline different variations under the ground. These results have also been used to discuss the limitations of the self-potential method applied to detect seepage in the dam.



## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	iii
REMERCIEMENTS .....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT .....	vii
TABLE DES MATIÈRES .....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES FIGURES.....	xiii
LISTE DES ABBRÉVIATIONS .....	xvi
LISTE DES ANNEXES.....	xvii
AVANT PROPOS.....	1
Chapitre 1 INTRODUCTION.....	2
1.1 OBJECTIFS.....	3
1.2 PLAN DU MÉMOIRE.....	4
Chapitre 2 PROBLÉMATIQUE DE LA DÉTECTION DES FUITES D’EAU DANS LES BARRAGES EN REMBLAI .....	5
2.1 BARRAGES EN REMBLAI .....	5
2.2 PERTES D’EAU DANS LES BARRAGES.....	6
2.2.1 MÉCANISME DE L’ÉROSION INTERNE ET DÉVELOPPEMENT DE RENARDS .....	8
2.2.2 EXEMPLE HISTORIQUE DU BARRAGE TETON ET DE DÉVELOPPEMENT D’ÉROSION INTERNE.....	11
2.3 MÉTHODES D’INVESTIGATION DES BARRAGES .....	13
2.3.1 RECHERCHE DES INDICATEURS DE FUITE D’EAU .....	13

2.3.1.1 ÉTUDE PRÉLIMINAIRE .....	13
2.3.1.2 INSPECTIONS VISUELLES .....	14
2.3.1.3 AUTRES MÉTHODES .....	14
2.3.2 MÉTHODES GÉOPHYSIQUES .....	16
2.3.2.1 MÉTHODES RÉALISÉES EN FORAGE .....	18
2.3.2.2 MÉTHODES NON DESTRUCTIVES EN SURFACE .....	18
2.4 CONCLUSION .....	20
Chapitre 3 THÉORIE DE LA POLARISATION SPONTANÉE .....	22
3.1 PHÉNOMÈNE D'ÉLECTRO-FILTRATION .....	23
3.2 THÉORIE DU FLUX COUPLÉ .....	25
3.3 CAS D'APPLICATION DU POTENTIEL D'ÉLECTROFILTRATION .....	27
3.3.1 RÉOLUTION NUMÉRIQUE DES ÉQUATIONS DE LA P.S. ....	28
3.3.2 EXEMPLES D'APPLICATIONS DE LA MÉTHODE P.S. ....	31
3.4 CONCLUSION .....	33
Chapitre 4 APPLICATION RÉALISÉE SUR LE SITE D'ÉTUDE .....	34
4.1 MISE EN CONTEXTE .....	34
4.1.1 PRÉSENTATION DU SITE .....	34
4.1.2 PROBLÉMATIQUE DU SITE ÉTUDIÉ .....	34
4.1.3 DIFFÉRENTES MÉTHODES APPLIQUÉES SUR LE SITE .....	35
4.1.4 AMPLITUDE ET SIGNE DES DIFFÉRENTS POTENTIELS .....	36
4.2 PROTOCOLE DES MESURES GÉOPHYSIQUES RÉALISÉES .....	38
4.2.1 PROTOCOLE DES MESURES DE POLARISATION SPONTANÉE .....	38
4.2.2 PROTOCOLE DES MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE .....	42
4.3 ÉTUDES ANTÉRIEURES ET PRINCIPAUX RÉSULTATS .....	43
4.3.1 RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE .....	43

4.3.2 POLARISATION SPONTANÉE (P.S.) .....	45
4.3.3 MAGNÉTOMÉTRIE.....	47
4.3.4 DÉBIT DE FUITE .....	47
4.3.5 THERMOMÉTRIE PASSIVE .....	48
4.4 OBJECTIF DU CHAPITRE.....	49
4.5 MESURES ET INTERPRÉTATIONS À LA JONCTION DES BARRAGES .....	50
4.5.1 RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE .....	51
4.5.2 POLARISATION SPONTANÉE .....	53
4.6 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA RÉPONSE P.S. ....	61
4.7 ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS .....	71
4.7.1 À PROPOS DES MESURES DE POLARISATION SPONTANÉE.....	71
4.7.2 À PROPOS DES MESURES DE TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE .....	75
Chapitre 5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	79
BIBLIOGRAPHIE .....	82
ANNEXES .....	88

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Statistique de dommages sur les larges barrages construits en 1986 et avant; tiré de (Foster <i>et al.</i> 2000) .....	8
Tableau 2.2: Étapes de la phase préliminaire et informations recherchées, tiré de Fauchard et Mériaux (2007).....	14
Tableau 3.1: Forces et Flux couplés adapté de Wurmstich (1995), Sheffer (2002).....	26
Tableau 4.1: Signe et amplitude des différentes sources de potentiel P.S. ....	36
Tableau 4.2: Signe et amplitude des différentes sources de potentiel P.S. (Suite) .....	37
Tableau 4.3: Propriétés physiques des sols du modèle .....	68
Tableau 4.4: Paramètres du modèle de résistivité .....	77

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Section d'un barrage à remblai adapté de Burke <i>et al.</i> , 1972 et tiré de (Sheffer, 2002)	6
Figure 2.2: Exemple de processus d'érosion interne dans un barrage : (A et B) avec formation de renard dans le remblai par érosion rétrogradant en amont et par fuite concentrée, (C) avec formation de renard dans la fondation par érosion rétrogradant en amont, et (D) avec formation de renard du remblai à la fondation (Fell <i>et al.</i> , 2001)	9
Figure 2.3: Influence de l'érosion interne sur les paramètres (ligne rouge = influence majeure, ligne semi-pointillée= influence incertaine, ligne bleue= influence non significative) (Johansson, 2007)	17
Figure 3.1: Représentation de l'interface solide-fluide adapté de Hibbert (1993) et tiré de (Sheffer, 2002)	24
Figure 3.2: Représentation schématique de la géométrie de la double couche électrique. Lors de l'écoulement, certains ions de la surface diffuse de la double couche sont transportés, générant un courant électrique de convection (Ganesh, 2006)	25
Figure 3.3: Courants de convection, sources des problèmes de potentiel d'électro-filtration adapté de Wurmstich et Morgan (1991)	29
Figure 4.1: Vue en plan des barrages à leur jonction. Les sorties d'eau visibles sont représentées par les ellipses (orange et bleue). L'ellipse orange désigne la fuite visible lorsque le réservoir est vide	35
Figure 4.2: Schéma d'implantation des électrodes; a) Électrodes dédoublées, b) Électrodes mise en place	38
Figure 4.3: Voltage entre les deux électrodes mobiles placées à la même position et l'électrode de référence E1. Les électrodes dédoublées sont présentées l'une après l'autre	41
Figure 4.4: Position des électrodes dédoublées, E1 est l'électrode de référence	41
Figure 4.5: a) Profil d'acquisition des mesures, b) Appareil de mesure pour la méthode de résistivité électrique	42
Figure 4.6: Tomographies électriques à la jonction en 2007 et Octobre 2008, adapté de (Giroux et Rivard, 2008)	44
Figure 4.7: Différence de potentiel entre les niveaux 35.33m et 26.8m du réservoir St-Timothée, tiré de Giroux et Rivard, (2008)	46

Figure 4.8: Différence de potentiel entre les niveaux 35.33m et 26.8m du réservoir St-Timothée représentée pour les profils AA' et BB' en amont et en aval cf. figure 4.7 .....	46
Figure 4.9: Variation du débit total à la jonction .....	48
Figure 4.10: Représentation des températures mesurées (traits noirs) et des températures calculées par modélisation numérique pour une couche de conductivité hydraulique $10^{-4}$ m/s et centrée au niveau 33.5m. Résultats tirés de (Smith <i>et al.</i> , 2009).....	49
Figure 4.11: Localisation des mesures à la jonction des barrages avec la position des profils de résistivité (réalisés en 2008 et 2009; le profil 1 est en bleu et le profil 2 en vert), la localisation des électrodes (l'électrode E1 est la référence) et les infiltrations visibles pendant la vidange et la mise en eau du réservoir St-Timothée sont indiquées par des ellipses. ....	50
Figure 4.12: Fuite d'eau visible en Amont du barrage St-Timothée (Réservoir vidé) .....	50
Figure 4.13: Suivi temporel réalisé sur le profil1 à la vidange 2009. ....	52
Figure 4.14: Suivi temporel réalisé au profil2 à la vidange 2009. ....	53
Figure 4.15: Distribution du potentiel à la jonction des barrages au début de la vidange 2009, niveau d'eau égale à 34.79m atteint le 03 Novembre 2009 .....	54
Figure 4.16: Distribution du potentiel, avant la vidange complète du réservoir St-Timothée, niveau d'eau égal à 35.33m atteint le 15 Août 2008. ....	55
Figure 4.17: Distribution du potentiel au profil le long du barrage pendant la vidange du réservoir (novembre 2009) .....	56
Figure 4.18: Mesure du potentiel spontané à l'électrode E7 pendant la vidange 2009 et variation du débit total à la jonction des barrages pour les périodes allant de 2008 à 2010. ....	57
Figure 4.19: Potentiel par rapport au niveau de référence 31.9m pour chaque charge .....	58
Figure 4.20: Mesure du potentiel spontané à l'électrode E7 pendant la vidange 2009 et le remplissage 2010, variation du débit total à la jonction des barrages. ....	59
Figure 4.21: Distribution du potentiel au profil le long du barrage pendant la mise en eau du réservoir (avril 2010).....	60
Figure 4.22: Potentiel par rapport au niveau de référence 33.4m pour chaque charge. ....	60
Figure 4.23: Géométrie du modèle adoptée avec direction d'écoulement en bleu; a)Plan xz, b) Plan yx .....	63

Figure 4.24: Sensibilité du potentiel à la variation du coefficient de couplage de tous les sols du modèle. Le rapport du coefficient $\alpha$ est de 2 entre le modèle 1 et le modèle 2 et de 2 entre le modèle 3 et le modèle 1 (coefficient <sub>modèle 3</sub> > coefficient <sub>modèle 1</sub> > coefficient <sub>modèle 2</sub> ).....	65
Figure 4.25: Sensibilité du potentiel à la conductivité électrique de tous les sols du modèle. Le rapport de conductivité électrique est de 2 entre le modèle 1 et le modèle 2, et de 2 entre le modèle 3 et le modèle 1 ( $\sigma_{\text{modèle 3}} > \sigma_{\text{modèle 1}} > \sigma_{\text{modèle 2}}$ ). Le modèle 1 correspond à la figure 4.24 a. ....	67
Figure 4.26: Étapes pour l'ajustement du modèle .....	69
Figure 4.27: Distribution du potentiel calculée à la surface pour la charge 34.79m.....	69
Figure 4.28: Profils extraits à partir des anomalies P.S. calculées.....	71
Figure 4.29: Comparaison des potentiels obtenus à débit faible pour chacune des opérations. ....	74
Figure 4.30: Récapitulatif de la procédure d'inversion pour la mise en évidence des variations latérales.....	76
Figure 4.31: Modèle de résistivité pour quantifier l'influence des variations latérales sur l'inversion 2D. Le plan est représenté sur une profondeur de 12m. La hauteur totale d'eau est de 9m.....	76
Figure 4.32: Pseudo-section, niveau 3m .....	77
Figure 4.33: Pseudo-section, niveau 6m .....	78
Figure 4.34: Suivi temporel réalisé entre les niveaux 3m et 6m. Le modèle de référence est au niveau 3m. ....	78

## LISTE DES ABBRÉVIATIONS

$g$	Accélération [ $\text{m/s}^2$ ]
$\sigma$	Conductivité électrique [ $\text{S/m}$ ]
$\sigma_s$	Conductivité électrique de surface [ $\text{S/m}$ ]
$\sigma_f$	Conductivité électrique du fluide [ $\text{S/m}$ ]
$\varepsilon$	Constante diélectrique [ $\text{F/m}$ ]
$K_s$	Conductivité hydraulique à la saturation [ $\text{m/s}$ ]
$K$	Conductivité hydraulique [ $\text{m/s}$ ]
$Q$	Densité du flux hydraulique [ $\text{m/s}$ ]
$J$	Densité du courant électrique [ $\text{A/m}^2$ ]
$\rho$	Densité volumique de l'eau [ $\text{kg/m}^3$ ]
$Q_v$	Excès de charge par unité de volume [ $\text{C/m}^3$ ]
$F$	Facteur de formation électrique [1]
$\nabla H$	Gradient hydraulique [1]
$\nabla V$	Gradient du courant électrique [ $\text{V/m}$ ]
$V$	Potentiel électrique [ $\text{mV}$ ]
$\zeta$	Potentiel Zéta [ $\text{V}$ ]
$k$	Perméabilité intrinsèque [ $\text{m}^2$ ]
$k_r$	Perméabilité relative
$\eta$	Viscosité du fluide [ $\text{Pa.s}$ ]
$u$	Vitesse d'écoulement [ $\text{m/s}$ ]



## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 .....	88
ANNEXE 2 .....	89

## **AVANT PROPOS**

Le projet de Maîtrise a été élaboré dans le cadre du projet de recherche "Localisation des infiltrations d'eau dans les barrages " d'Hydro-Québec. À cet effet, un mandat a été accordé en Octobre 2007 à l'École Polytechnique de Montréal et à l'université de Sherbrooke pour mener des études dans les barrages en terre.

Dans le contexte de ce projet, le mémoire discute sur un cas d'application de barrages en terre.

## Chapitre 1 INTRODUCTION

Les barrages ont une grande importance dans notre société, tant sur le plan économique qu'environnemental. On dénombre deux grands types de barrages : les barrages en remblai et les barrages en béton. Comme toute construction, ces barrages sont exposés à des dommages qui peuvent aller des fissurations ou fracturations à la rupture du barrage. Une probabilité élevée de réalisations de ces incidents a été recensée dans les vieux<sup>1</sup> barrages en remblai (Marche, 2008). Depuis les années 80, des études sur les barrages ont de plus en plus éclairci les causes associées à ces dommages. L'érosion interne, qui conduit pour la plupart à la présence de fuites d'eau dans le barrage; est considérée parmi les principales causes de dommage.

Des recommandations sur l'entretien des barrages ont été établies par la Commission Internationale sur les Grands Barrages, ICOLD, en 1987. Entre autre, il a été jugé nécessaire d'effectuer des inspections et d'adopter des programmes de surveillance appropriés pour obtenir plus d'informations sur le statut des barrages en remblai. Ceci est notamment évalué par la mesure des infiltrations ou l'évaluation des fuites, la mesure des pressions et l'observation des mouvements (en surface ou sur les flancs). Les mesures d'infiltration donnent une bonne couverture du barrage entier, par rapport à celle de la pression et des mouvements qui fournissent des informations ponctuelles. Toutefois, des petits changements locaux pourraient ne pas être détectés par la mesure des infiltrations ou pourraient ne pas survenir en des lieux coïncidant avec les opérations ponctuelles. Ceci joue sur la sensibilité des méthodes à détecter les petits changements.

Le développement des méthodes géophysiques a donc fait croître l'utilisation de certaines méthodes non-destructives en association avec les méthodes conventionnelles telles que l'inspection visuelle pour l'investigation et le monitoring des barrages afin d'améliorer la qualité des mesures. Dans cette grande famille de méthodes, notre choix s'est porté sur la méthode de polarisation spontanée (P.S.) (Giroux et Rivard, 2007). L'adaptation des équations théoriques indique que la méthode de polarisation spontanée peut détecter à travers le mécanisme du

---

<sup>1</sup> Barrages construits entre 1920 et 1980.

potentiel couplé la circulation d'eau dans la matrice poreuse du barrage. La présence de cette circulation représente l'une des sources de la variation du potentiel électrique obtenue en réponse P.S. De plus, par sa capacité de pouvoir mesurer le voltage créé par de faibles charges hydrauliques à partir de la surface (Sheffer et Howie, 2003), la P.S. vient se classer parmi les outils les plus utilisés dans l'investigation et le monitoring des barrages.

Plusieurs projets ont été entrepris notamment dans des conditions d'infiltration, d'essai de pompage, de détection de niveau d'eau dans des zones fracturées (Fragerlund et Heinsom, 2003) et de détection de fuites d'eau dans les barrages comme nous en parlerons au chapitre 3. Ces projets ont permis de valider l'applicabilité de la méthode P.S. et d'aborder l'aspect de l'évaluation quantitative directe des conditions de fuites d'eau et d'infiltration par la réponse P.S. À cet effet, des modèles numériques 2D et 3D ont été développés pour calculer la distribution du potentiel spontané en milieux poreux à des fins d'interprétation.

Nous nous proposerons de manière complémentaire d'évaluer la sensibilité de la méthode P.S. face à une situation de fuite qui sévit sur le site d'un vieux barrage et de localiser quantitativement les zones de fuite. Il s'agira ainsi de proposer un modèle du barrage qui s'ajuste au mieux aux données de P.S. obtenues sur le terrain afin d'optimiser les travaux d'injection de coulis et de mieux comprendre les mécanismes d'écoulement. Les caractéristiques des sols sur le site sont mal connues et la quantification des zones de fuite est faite conjointement à la méthode thermométrique et de résistivité électrique.

## **1.1 OBJECTIFS**

L'objectif général du projet de maîtrise est de déterminer les limites d'applicabilité de la méthode de polarisation spontanée pour localiser les écoulements d'eau sur le site de deux barrages en remblai.

Des mesures de polarisation spontanée ont été faites à différentes périodes et la réponse P.S. a été calculée par modélisation numérique directe de manière à interpréter quantitativement les mesures acquises sur le site.

## **1.2 PLAN DU MÉMOIRE**

Nous nous proposons ici de présenter le travail réalisé en cinq chapitres principaux. Suivant la présente introduction, le Chapitre 2 passe en revue les notions de fuites d'eau au niveau d'un barrage et diverses méthodes d'investigation possibles en théorie et en pratique pour leur détection. De plus, on discute brièvement des problèmes liés à cette détection. Le Chapitre 3 présente les notions théoriques de la méthode P.S. et divers travaux qui ont déjà été réalisés avec l'approche proposée. Le chapitre 4 est dédié à l'application de la méthode sur le site d'un barrage en remblai. Les résultats obtenus par modélisation et ceux des mesures acquises sur le terrain y sont discutés. Finalement, le chapitre 5 conclut sur la synthèse des travaux accomplis et les recommandations.

## **Chapitre 2 PROBLÉMATIQUE DE LA DÉTECTION DES FUITES D'EAU DANS LES BARRAGES EN REMBLAI**

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur la problématique de la détection des pertes d'eau dans un barrage. Nous aborderons dans un premier temps, la cause des pertes dans les barrages, puis, discuterons de la problématique de la détection des fuites, pour enfin décrire les méthodes géophysiques qui sont les plus utilisées de nos jours pour la détection des fuites d'eau.

### **2.1 BARRAGES EN REMBLAI**

Les barrages en remblai sont souvent construits en fonction de la distribution granulométrique des sols de construction. Certains auteurs ont présenté les types possibles de barrages (dans le cas des petits barrages) qui sont réalisés suivant la granularité des matériaux en place (Alonso *et al.*, 2002). Dans certains cas, il s'avère nécessaire d'utiliser les zones de transition pour séparer les différentes zonations de la structure. Ces zones de transition jouent aussi le rôle de filtre de séparation afin de prémunir les barrages des effets d'infiltration à travers le remblai. Les barrages en remblai sont regroupés en:

- Barrage homogène ou pseudo-zoné pour lequel les matériaux sont répartis dans le corps du barrage en fonction de leur granularité ou de leur humidité, mais sans que des filtres de séparation ne soient nécessaires. Le contrôle des infiltrations peuvent se faire par auto-filtration dans le barrage.
- Barrage en terre zoné construit pour une disponibilité des matériaux fins en quantité limitée et des matériaux grossiers en quantité suffisante, avec un noyau central ou un massif amont.
- Barrage en terre ayant une étanchéité artificielle et pour lequel les matériaux fins ne sont pas utilisés pour l'étanchéité du barrage (Alonso *et al.*, 2002).

Selon les normes modernes, la conception typique d'un barrage en remblai consiste, comme le montre la figure 2.1, en:

- un noyau central, zone d'étanchéité de la structure, avec un certain contenu en silt et/ou en argile.

- des couches de drainage qui ont pour rôle d'intercepter les pertes d'eau dans le corps du barrage ou de la fondation. et de fournir un point de récupération en aval pour garder la plus grande partie du flanc sèche.

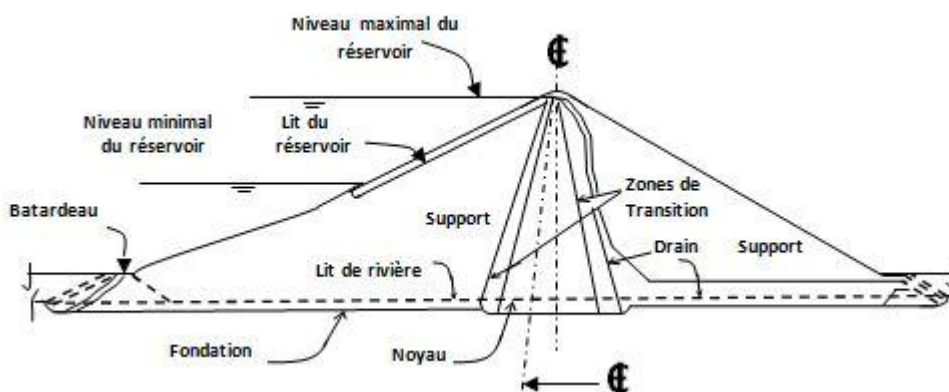


Figure 2.1: Section d'un barrage à remblai adapté de Burke *et al.*, 1972 et tiré de (Sheffer, 2002)

## 2.2 PERTES D'EAU DANS LES BARRAGES

Le phénomène lié aux pertes d'eau dans un barrage est qualifié de non stable, non linéaire et non homogène (cf. paragraphe 2.2.2) de par le mécanisme auquel il est associé. La compréhension de ce mécanisme requiert la connaissance de l'hydraulique, de l'hydrodynamique, de l'érosion des sédiments et des aspects géotechniques (Singh *et al.*, 1988) qui pourraient se produire au niveau du barrage. Dans la littérature, ces événements sont interprétés par rapport aux incidents découlant :

- Des méthodes de construction et de l'état des remblais qui se définiraient par le type et la mise en place des matériaux, par leur état de compaction, par la variation de saison au cours de la construction.
- Des comportements géotechniques des structures du barrage mettant en évidence une augmentation de l'intensité des déformations et des contraintes entre les matériaux pendant et après la construction du barrage en remblai. Les déformations sont provoquées par la variation des contraintes entre les différentes zones du barrage, les effets de fluage et les déformations de la fondation. Les poussées hydrostatiques d'eau du réservoir pendant le remplissage peuvent causer des déformations supplémentaires (Massiéra *et al.*, 2008).

- Des problèmes de stabilité dans le barrage résultant d'écoulement avec des gradients trop élevés ou critiques, de trop fortes pressions interstitielles dans la structure.
- Des actions exceptionnelles telles que des débordements d'eau au-dessus de la crête du barrage ou de son évacuateur de crue, de la rupture sur le flanc amont du barrage, du retard dans la construction.

Les pertes d'eau résultent généralement de la combinaison de plusieurs de ces causes. Cependant, la plupart des dommages sont reliées au déversement et à la présence de renards comme le présentent les statistiques effectuées par Foster *et al.* (2000), présentées au tableau 2.1. Ces statistiques ont été compilées à partir de 124 grands barrages construits depuis 1986 et dont le mode d'endommagement est bien connu. Comme nous le verrons plus loin, la formation de ces renards est une conséquence de l'évolution de l'érosion interne dans le barrage.



**Tableau 2.1: Statistique de dommages sur les larges barrages construits en 1986 et avant; tiré de (Foster *et al.* 2000)**

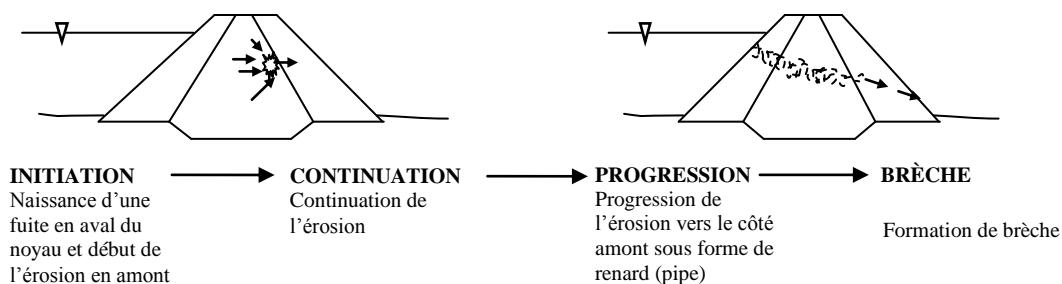
Mode d'endommagement	% de pertes totales
Renard par remblais	31
Renard par fondation	15
Renard des remblais à la fondation	2
Instabilité des pentes	4
Déversements	46
Tremblements de terre	2

### **2.2.1 MÉCANISME DE L'ÉROSION INTERNE ET DÉVELOPPEMENT DE RENARDS**

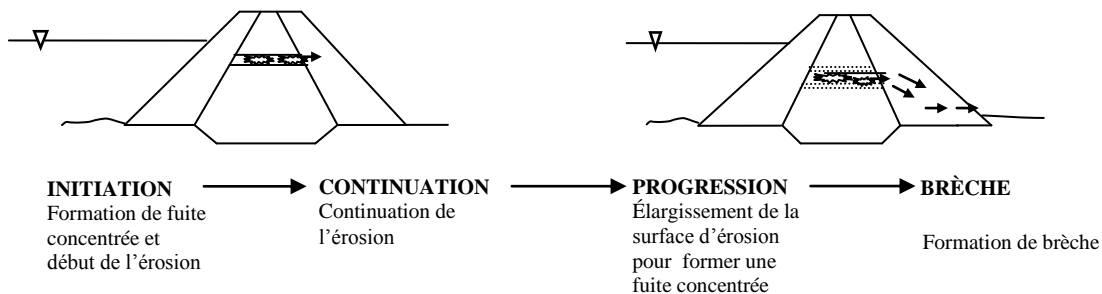
L'érosion interne est un processus selon lequel les particules sont éloignées du noyau ou de la fondation en empruntant des voies de migration préférentielles. Ce procédé est initialement favorisé par :

- ✓ La présence d'un chemin d'infiltration et d'une source d'eau,
- ✓ L'existence de matériaux érosifs à l'intérieur de ce chemin et transportables par le flux d'infiltration,
- ✓ L'absence de protection qui pourrait retenir ces particules.

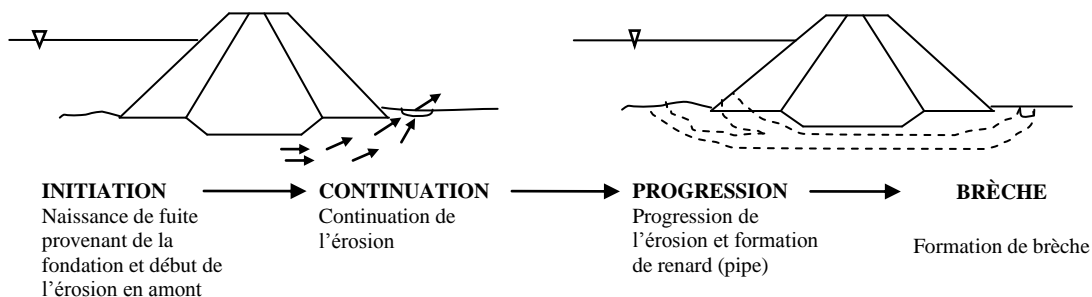
Plus le processus de l'érosion évolue, plus il y a de chance que se forment dans le barrage des conduites de circulation d'eau. Ces dernières se localiseraient (Foster *et al.*, 2000) à 50% dans le remblai, à 40% dans la fondation ou à 10% relierait le remblai à la fondation (tableau 2.1; figure 2.2).



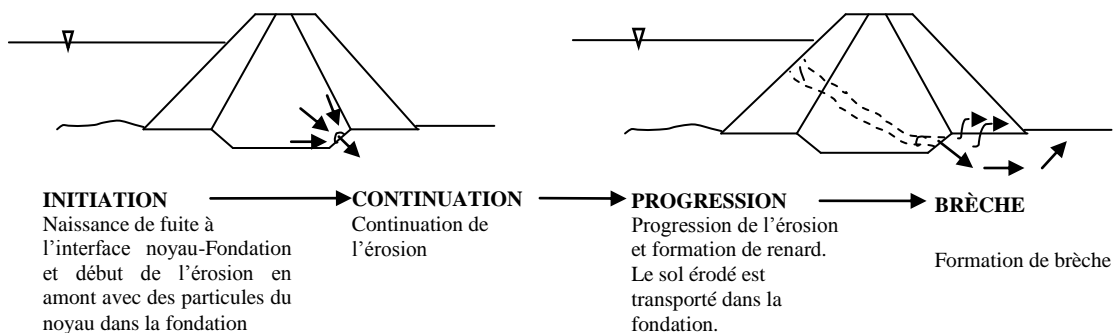
#### A) RENARD DANS LES REMBLAIS INITIÉ PAR UNE ÉROSION RÉGRESSIVE



#### B) RENARD DANS LES REMBLAIS AMORCÉ PAR UNE CONCENTRATION DE FUITE



#### C) RENARD DANS LA FONDATION AMORCÉ PAR UNE ÉROSION RÉGRESSIVE



#### D) RENARD DES REMBLAIS À LA FONDATION AMORCÉ PAR UNE ÉROSION RÉGRESSIVE

Figure 2.2: Exemple de processus d'érosion interne dans un barrage : (A et B) avec formation de renard dans le remblai par érosion rétrogradant en amont et par fuite concentrée, (C) avec formation de renard dans la fondation par érosion rétrogradant en amont, et (D) avec formation de renard du remblai à la fondation (Fell *et al.*, 2001)

En effet, l'évolution de l'érosion interne et le développement de renards (*piping*) s'apprécient bien suivant les phases d'initiation, de continuité, de progression et de développement de brèches. C'est un processus qui est assez variable dans le temps tel que nous l'illustrerons au prochain paragraphe. Il peut aller de quelques heures à quelques années jusqu'à la formation complète de brèche dans la structure (Fell *et al.*, 2003).

(a) L'initiation :

Cette phase se manifeste quand un phénomène de détachement de particules apparaît. Ce phénomène peut à son tour être soutenu, lorsqu'il existe au sein du barrage, par:

- Une concentration de fuite dans les fissures préexistantes ou causées par dessiccation, par gel ou dégel et/ou par fracturation hydraulique.
- Une concentration de fuite dans les voies interconnectées formées par les matériaux grossiers et/ou de faible compaction dans la zone perméable.
- Un détachement des particules du sol en présence d'infiltration dans une surface libre non protégée par des filtres.
- Un phénomène de la suffusion: définie comme étant une érosion sélective des particules fines de la matrice de particules grossières.

(b) La continuité de l'érosion :

Cette phase dépend de la présence dans le barrage de filtres et de zones de drainage construits en respectant les critères de construction des filtres. Ce qui n'est pas souvent le cas retrouvé dans les vieux barrages. La présence de ces filtres et de ces drains dans un barrage permet de retenir les particules déplacées pendant la décharge dans la fondation ou le remblai sans toutefois favoriser l'accumulation d'un excès de pression dans les pores (ICOLD, 1994). C'est un rôle qui est aussi accompli grâce au processus d'auto filtration du barrage. Toutefois, leur absence contribuerait à la progression de l'érosion dans le domaine (Foster *et al.*, 2000).

(c) La progression de l'érosion :

Cette étape est définie par une évolution graduelle vers le côté amont du barrage du détachement des particules qui sont transportées par le flux d'infiltration. Elle favorise la formation et le

maintien des renards, l'augmentation du suintement et de la pression des pores dans la partie aval du barrage.

(d) Le développement de brèches :

Cette phase résulte de la circulation des eaux du réservoir (principalement celui en amont). A ce niveau, le processus d'érosion interne est bien avancé. Les eaux qui circulent dans le barrage se sont défini une trajectoire aléatoire.

### **2.2.2 EXEMPLE HISTORIQUE DU BARRAGE TETON ET DE DÉVELOPPEMENT D'ÉROSION INTERNE**

Le barrage Teton est un exemple de grand barrage en remblai dans lequel des variations importantes des pertes d'eau ont abouti à une rupture de la structure. Le barrage de 94m de hauteur avait été construit en 1975 à des fins hydroélectriques. En 1976, on note le développement rapide d'une érosion interne, développement rétrograde au cours des premières années de remplissage du réservoir qui fait place à la formation de renards du noyau vers la fondation de la structure.

Aucun signe de fuite n'avait été constaté dans les huit premiers mois de remplissage du réservoir en 1975. Cependant, deux jours avant la catastrophe, soit le 3 Juin 1976, des écoulements d'eau avaient été repérés en aval du barrage d'environ 6.31 l/s de débit. Un jour avant, une augmentation de l'humidité en aval sur l'appui latéral du barrage est détectée et des écoulements d'eau additionnels d'environ 1.3 l/s étaient visibles. Le 5 juin 1976 à 7h, des débits de fuite d'eau de 56 l/s ont été mesurés sous le sommet du barrage provenant d'une source à la jonction remblai-appui. Par la suite, des fuites d'environ 500 à 800 l/s ont été mesurées au pied du barrage sur le côté aval (Marche, 2008; Solava et Delatte, 2003). Ces eaux contenaient des débris de matériaux. Trois heures après, le débit avait augmenté remarquablement d'environ 400 l/s. Il avait été noté une progression ascendante de l'érosion vers l'amont du barrage. Le phénomène aurait ainsi progressé jusqu'à l'effondrement du barrage 4 heures après le début des grosses fuites d'eau.

Des études approfondies après la rupture du barrage, ont conclu que, d'une part le site était principalement caractérisé par la présence d'un vaste système rhyolite-tuf dans le substratum qui le rendait ainsi perméable. D'autre part, le noyau contenait en grande partie du silt provenant d'un abondant dépôt éolien. Il constituait donc la partie du barrage la plus vulnérable à une érosion. Les résultats avaient été confirmés par des essais de pompage, des tests de percolation et des études géotechniques réalisés sur le site (Seed et Duncan, 1987; Smalley et Dijkstra, 1991).

## **2.3 MÉTHODES D'INVESTIGATION DES BARRAGES**

Plusieurs types de méthode sont utilisés pour investiguer les barrages. La plus grande partie des informations présentées dans cette sous-partie est tirée du guide d'instrumentation et d'interprétation de (Fauchard et Mériaux, 2007). Ce guide propose une méthodologie générale pour la procédure d'investigation et de suivi dans les barrages qui est basée sur la recherche des indicateurs de fuite d'eau, ainsi que l'exploration géotechnique et géophysique.

### **2.3.1 RECHERCHE DES INDICATEURS DE FUITE D'EAU**

#### **2.3.1.1 ÉTUDE PRÉLIMINAIRE**

Elle consiste à réunir le maximum d'informations reliées à l'historique du barrage, ses caractéristiques topographiques, la connaissance de la géologie locale et l'hydrodynamique de la région. Ceci demanderait un compte-rendu des activités entreprises comme la description du site d'approvisionnement des matériaux de construction, la localisation de brèches antérieures s'il y a eu lieu, et les moyens mis en jeu pour y remédier. Le tableau 2.2 détaille les étapes que peut contenir cette phase et les informations qui en ressortent.

Tableau 2.2: Étapes de la phase préliminaire et informations recherchées, tiré de Fauchard et Mériaux (2007).

Étapes proposées	Informations recherchées
Recherche historique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se renseigner sur les données disponibles (chez les opérateurs du barrage, dans les publications nationales, les cartes, les dessins topographiques et les photos,...).</li> <li>• Tenir compte de la localisation d'éventuelles brèches ou fissurations importantes antérieures.</li> <li>• Se renseigner sur les sites d'approvisionnements des matériaux.</li> </ul>
Étude géologique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identifier les matériaux de construction.</li> <li>• Déterminer la nature de la fondation.</li> <li>• Décrire les arrangements et les caractéristiques des formations géologiques.</li> </ul>
Analyse morphodynamique	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identifier et caractériser les changements passés du canal du cours d'eau ou du système «barrage- cours d'eau ».</li> </ul>
Données topographiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consulter les sections transversales.</li> <li>• Consulter les cartes topographiques.</li> </ul>

### 2.3.1.2 INSPECTIONS VISUELLES

L'objectif de ces inspections est de pouvoir vérifier et compléter les informations recueillies durant le stade de recherche sur l'historique du barrage. Elles permettent ainsi d'identifier et de relier les aspects morphologiques externes au barrage en plus de tout indice qui a révélé ou qui laisse croire à la présence de fuite d'eau comme la présence de végétation, les écoulements d'eau visibles ou l'existence de franc-bord<sup>2</sup>(Fauchard et Mériaux, 2007).

### 2.3.1.3 AUTRES MÉTHODES

Des méthodes supplémentaires sont couramment utilisées dans la mise au point des systèmes de surveillance de barrages. Il s'agit des dispositifs d'auscultation basés, par exemple, sur des mesures dans des piézomètres installés dans le barrage et au niveau des déversoirs de jaugeage, des essais géotechniques, des mesures réalisées en forage.

<sup>2</sup> Hauteur entre la surface de l'eau et le niveau du pont.

Ces méthodes permettent éventuellement de mesurer :

- Les mouvements internes et les mouvements externes au sommet et sur les pentes : les mouvements sont mesurés en des points sur la surface du barrage ou dans des tubes avec des inclinomètres et des extensomètres. Ce sont des mesures qui peuvent être prises autant en continu que de manière échantillonnée à des périodes préétablies. Jusqu'à la phase finale de développement de la déformation, la relation entre ces mouvements et le flux d'infiltration d'eau est quasi faible dû à l'effet de voûte (Johansson, 2004). La possibilité de détecter l'érosion interne avec les mesures des mouvements sera par conséquent minime.
- Le flux d'infiltration d'eau : cette mesure aide dans la connaissance sur l'efficacité des éléments imperméables du barrage particulièrement lorsqu'au cours de la mesure, on retrouve des débris.
- La pression interstitielle : la mesure de la pression à un nombre de points fournit des informations sur la distribution des pressions dans le barrage. Faite en continue, cette mesure pourrait indiquer des changements de pressions liés à une détérioration ou au vieillissement du barrage.

Certains de ces dispositifs d'auscultation sont généralement installés dans le barrage au moment de sa construction, mais leur durée de vie est en général inférieure à celle de la structure. Le barrage a ainsi besoin d'être ré-instrumenté en cas de dysfonctionnement, ce qui demanderait une attention particulière notamment pour les vieux barrages. De plus, il apparaît que pour détecter l'érosion interne, le système d'instrumentation devra être efficace et couvrir de larges surfaces par rapport aux méthodes de visualisation. Ce dernier point n'est pas tout à fait satisfait pour la grande partie des méthodes d'auscultation communément employées (mesures dans les piézomètres, mesures des flux) car elles caractérisent les sols de façon ponctuelle. Ceci s'avère problématique pour la détection de la circulation des eaux (Fell *et al.*, 2001).

Les méthodes abordées dans cette section fournissent donc des informations pour une étude approfondie dans le projet d'investigation. On a recours dans certains cas aux méthodes géotechniques destructives (avec la réalisation de forages pour l'extraction d'échantillons d'essais). Bien que complémentaires, ces méthodes semblent insuffisantes pour localiser le parcours des écoulements d'eau dans l'ouvrage ou dans sa fondation.



### 2.3.2 MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Dans cette même lancée, le choix et la fréquence d'application des méthodes géophysiques d'investigation pour l'investigation de barrage seront influencés par :

- (a) Le type de barrage : la sélection des techniques tient compte du fait que le barrage est homogène ou non. En outre, un barrage sans aucun filtre ou zone de drainage demanderait plus d'attention qu'un autre construit avec un respect des normes de construction ou avec des filtres présentant un certain degré de protection.
- (b) Le type de fondation : un barrage sur une fondation perméable nécessiterait plus d'inspections et des fréquences de monitoring que celui sur un roc sain.
- (c) Les dimensions du barrage : l'étude est plus poussée selon que l'on a affaire à un grand barrage ou non.
- (d) La période de construction du barrage: Dû à une différence entre les pratiques de construction de barrage, il y a un besoin d'effectuer des monitorings fréquents sur les vieux barrages. On dénote qu'il est mieux de réaliser ces monitorings pendant les premiers remplissages du réservoir, parce qu'il y a une grande probabilité que les fuites se développent pendant cette période comme avait été le cas du barrage Teton (cf. paragraphe 2.2.2).
- (e) Le niveau du réservoir, comparé au plus haut et au plus bas niveau historique : si le niveau du réservoir est inférieur à l'élévation à laquelle se situe la fuite, il y a une grande probabilité qu'elle ne soit pas détectée.
- (f) La pertinence déduite des informations recueillies au cours de la recherche historique.
- (g) Les paramètres physiques mis en jeu lors du phénomène d'érosion interne.

Le transport et la perte de particules fines causent une augmentation de la porosité. C'est une augmentation qui pourrait conduire à une élévation de la perméabilité, participer à une hausse du flux d'infiltration et conduire à l'augmentation de la surface d'infiltration. Johansson *et al.* (1995) ont montré que l'augmentation de la porosité affecte aussi les paramètres tels que la densité, la vitesse sismique, la permittivité diélectrique, la conductivité hydraulique, la température et la résistivité électrique (figure 2.3). En général, la porosité, le flux d'infiltration et la pression dans les pores sont les paramètres physiques indicateurs de la présence d'érosion interne dits paramètres primaires. De l'analyse faite par Johansson, certains paramètres sont plus influencés

que d'autres à la variation de ces paramètres primaires. Ainsi le choix porté sur une méthode associée à l'un des paramètres les plus influencés aurait une grande probabilité de détection des signes de l'érosion interne dans le barrage. Il serait donc plus probable que la thermométrie soit plus sensible à la variation du flux d'infiltration qu'aux changements de porosité dans le sol ou que la méthode de résistivité électrique ait une faible sensibilité due à la variation de la porosité et du flux d'infiltration.

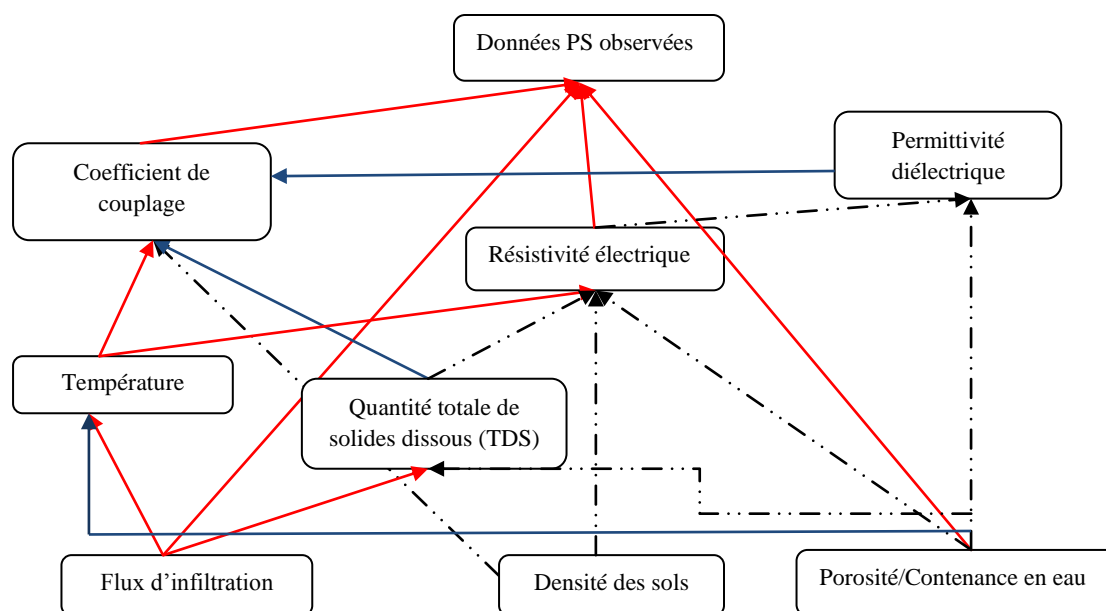


Figure 2.3: Influence de l'érosion interne sur les paramètres (ligne rouge = influence majeure, ligne semi-pointillée= influence incertaine, ligne bleue= influence non significative) (Johansson, 2007)

### 2.3.2.1 MÉTHODES RÉALISÉES EN FORAGE

La mise en place de forages permet l'application de certaines techniques précises parmi lesquelles:

- La thermométrie passive : La méthode consiste à mesurer les changements de température dans le sol. Ces changements de température sont particulièrement gouvernés par les variations de température dans l'air et dans les réservoirs. Les infiltrations d'eau modifient le profil de température et permettent de localiser et de quantifier la perméabilité du sol.
- La thermométrie active : La méthode consiste à mesurer l'évolution de la température d'un câble lorsqu'on le chauffe pendant une période déterminée. Le gradient temporel de la température est influencé par la conductivité thermique du sol et des infiltrations d'eau qui refroidissent localement le câble chauffé. Côté *et al.* (2008) ont mis en évidence son aptitude à détecter des changements de vitesse d'écoulement de manière à indiquer les zones d'écoulement préférentiel dans un milieu saturé. Les appareils de mesure peuvent être installés lors de la construction dans le cœur de l'ouvrage ou à partir du pied aval.
- Les méthodes tomographiques : capables de détecter des petits changements, elles fournissent des informations supplémentaires sur la condition des barrages (Carlsten *et al.*, 1995; Johansson, 1997). Ces méthodes réalisées dans deux forages distants donnent une image 2D du sol entre ceux-ci. La tomographie radar et la tomographie électrique sont très employées dans des applications de détection de fuite d'eau. La tomographie radar permettant de délimiter les zones du barrage (principalement les limites du noyau argileux) (Carlsten *et al.*, 1995; Johansson, 1997).

### 2.3.2.2 MÉTHODES NON DESTRUCTIVES EN SURFACE

Les méthodes non destructives sont des méthodes les plus convoitées, vue leur application rapide par rapport à celle des méthodes destructives et l'aspect environnemental qu'elles apportent. Ceci permettrait de pouvoir les utiliser sans un souci de causer des endommagements supplémentaires (fracturations créées par la réalisation de forage par exemple) notamment lorsqu'il s'agit de vieux barrages.

- Les méthodes sismiques, la méthode radar, les méthodes électromagnétiques: elles sont plus utilisées à des fins d'investigation que de monitoring et fournissent ainsi des

informations additionnelles notamment pour la détection des zones de faiblesse qui pourraient résulter de l'érosion interne ou favoriser le processus, ainsi que pour les mesures de variabilité des propriétés physiques des sols mettant en évidence de cette manière l'hétérogénéité de la structure.

- (a) Les méthodes acoustiques (méthodes sismiques) : De l'analyse de la propagation des ondes de compression dans le sol, la méthode permet d'identifier les réflecteurs dans la structure, signe d'hétérogénéité.
  - (b) La méthode radar (GPR): La méthode est très employée dans certaines applications et aussi en inspection des ouvrages. Elle permet particulièrement de déceler le contraste de permittivité et de conductivité électrique du sol, en sous-entendu la teneur en eau contenu dans le sol. Elle fournit de cette manière des informations sur l'hétérogénéité de la structure. La méthode est par contre inefficace en présence de matériaux électriquement conducteurs tels que l'argile, car les ondes électromagnétiques émises y sont fortement atténuées. Ceci limite son application pour la détection des changements dans le noyau du barrage pendant le processus d'érosion interne et limite son application en termes de profondeur d'investigation pour des projets sur un barrage.
  - (c) Les méthodes électromagnétiques (EM et RMT) : Elles consistent à émettre , à une fréquence donnée, un champ électromagnétique primaire qui induira un champ secondaire dont l'amplitude et le déphasage dépend de la conductivité du sol. Dépendamment de la fréquence d'utilisation et de la nature des matériaux du sol, le champ atteint une certaine profondeur de pénétration. Dès lors, les méthodes permettent de le visualiser jusqu'à une certaine profondeur d'investigation qui peut être estimée à 1. 5 fois leur séparation en mode coplanaire horizontal et à 0.75 fois la séparation en mode coplanaire vertical. Elles sont sensibles à l'hétérogénéité du sol, permettant ainsi de distinguer les corps conducteurs des corps résistants à des profondeurs approximatives.
- La méthode de résistivité électrique : Son principe se résume à l'injection d'un courant électrique dans le sol pour en mesurer la résistivité apparente. Selon la teneur en eau, la quantité d'ions dissous (TDS), et la température de l'eau contenue dans les pores (figure 2.3), cette résistivité varie entre différentes formations géologiques du sol ou du barrage.

La méthode permet ainsi d'étudier la stratification du barrage et la distribution de son hétérogénéité. Il apparaît donc que plus la profondeur d'investigation de la méthode est grande, nombreuses sont les informations qui découlent de l'imagerie du barrage car le barrage est exploré en entier (Fauchard et Mériaux, 2007). Ceci se fait malheureusement au détriment de la résolution de l'image obtenue.

- La méthode P.S. : La méthode électrique de Polarisation Spontanée diffère de beaucoup de la méthode de résistivité électrique et des méthodes électromagnétiques tout d'abord de par son principe, puis par les phénomènes qui lui sont associés et que nous détaillerons au prochain chapitre. À partir de certaines applications de la méthode de polarisation spontanée au barrage, un certain nombre de restrictions et limitations ont été introduites. Aubert et Atangana (1996), qui ont effectué des mesures dans une région volcanique, présentent par exemple que les réponses de polarisation sont nettement mieux interprétées lorsque les interfaces de couches sont non horizontales. se restreint à certaines limites. Les résultats de la méthode sont appréciées pour des sols superficiels électriquement résistants que les sols adjacents (Beddiar *et al.*, 2002; Salmon et Johansson, 2003) et pour des interfaces de couches non horizontales (Aubert et Atangana, 1996).

## 2.4 CONCLUSION

En résumé, les statistiques du tableau 2.1 indiquent que l'érosion interne est l'une des principales causes de dommages dans les barrages. Le processus d'érosion en lui-même est un phénomène qui peut aboutir rapidement dans le temps à la formation de renards, voire à une rupture de la structure. Pour apporter des solutions, notamment pour le suivi et le maintien des structures, les méthodes d'investigation sont sélectionnées sur la base des caractéristiques du barrage, sur le monitoring à long terme, sur la résolution et la précision.

Dans le domaine de la géophysique, les méthodes de thermométrie et électriques semblent répondre le mieux à l'évaluation de l'endommagement, particulièrement à sa localisation. Ceci est dû à la sensibilité des méthodes aux changements physiques dans le sol résultant de la présence de l'endommagement. Les méthodes d'imagerie (radar, EM, RMT, résistivité électrique) fournissent des informations complémentaires tant pour des interprétations

qualitatives que quantitatives, principalement sur l'hétérogénéité de la structure et sur la reconnaissance des zones de faiblesse et d'écoulement dans le barrage.

### Chapitre 3 THÉORIE DE LA POLARISATION SPONTANÉE

La méthode de Polarisation Spontanée (P.S.) est basée sur la mesure du potentiel généré naturellement dans le sol, sans influence humaine directe. Le potentiel spontané est causé par un certain nombre de processus dont les principaux sont de nature électrocinétique, thermoélectrique, électrochimique et minérale. Ces mécanismes sont associés à la génération d'un courant électrique, pouvant provenir de la circulation de l'eau souterraine, ou de l'action de l'eau comme étant un électrolyte ou un solvant de divers minéraux. Ils engendrent ainsi :

- un potentiel d'électro-filtration dû à la circulation du fluide,
- un potentiel thermique causé par un gradient de température,
- un potentiel électrochimique généré par la différence de concentration des électrolytes,
- un potentiel dit minéral, associé à la présence de particules métalliques.

La présence de ces sources variées fait de cette méthode l'une des plus difficiles en matière d'interprétation au cours des investigations géophysiques. Il peut apparaître plus commode d'utiliser d'autres méthodes électriques pour la mesure du potentiel électrique dans le sol. L'interprétation déduite de ces méthodes se rapporte principalement à l'évaluation des propriétés physiques du sol telle que la porosité, la saturation en eau ou le pourcentage d'argile contenue, à la présence et à la détection des couches plus ou moins conductrices. Par rapport à leur principe d'emploi, la méthode de la Polarisation Spontanée est relativement simple et peu coûteuse. De plus, la méthode P.S. permet de cartographier le potentiel électrique généré afin de révéler un ou plusieurs mécanismes de polarisation qui se sont produits dans le sol (Sharma, 1997). Ceci représente un avantage indéniable pour certaines applications.

Les domaines minier et environnemental sont comptés parmi les principaux secteurs d'applications. Initialement, la méthode de Polarisation Spontanée a été utilisée en exploration minière par Fox en 1830 pour la détection des dépôts de sulfures métalliques. Ensuite, elle a été appliquée comme outil complémentaire à la méthode de polarisation provoquée pour la localisation de gisements minéralisés (minéraux disséminés) (Corwin, 1976), ainsi que pour la détection des cavités (Vichabian et Morgan, 2002). Étendue aux investigations géothermiques et

environnementales, la méthode de Polarisation Spontanée a été utilisée pour la localisation et la modélisation des sources associées aux mouvements des fluides thermaux et de l'eau souterraine, ainsi que pour la caractérisation et le suivi des écoulements souterrains (Reynolds, 1997). Les mesures peuvent être faites aussi bien en forage qu'à la surface du sol (Reynolds, 1997).

Pour l'investigation dans les barrages en terre ou en enrochement, la méthode de polarisation spontanée est basée sur la mesure du potentiel électrique appelé potentiel d'électro-filtration, dérivant de la circulation du fluide dans le milieu poreux (Rozycki *et al.*, 2006). Une telle circulation met en évidence la présence d'un gradient hydraulique ou d'un gradient de pression. Elle est responsable d'une source de courant qui prend naissance du transport de charges électriques dans le sol. Le courant ainsi créé est d'origine électrocinétique. C'est justement à ce mécanisme relié au processus électrocinétique que nous nous intéresserons dans notre travail. Il met en premier plan la génération d'un potentiel développé par la circulation du courant d'origine électrocinétique.

Nous ferons dans ce chapitre un rappel du phénomène d'électro-filtration, de la théorie et une revue de littérature visant à explorer les travaux qui ont eu trait principalement à l'interprétation de la P.S. liée au mécanisme d'électro-filtration.

### **3.1 PHÉNOMÈNE D'ÉLECTRO-FILTRATION**

Le flux hydraulique à travers une région capillaire ou un matériau poreux peut générer un potentiel électrique le long de l'écoulement, lequel porte le nom de potentiel d'électro-filtration. L'effet est caractérisé par le couplage électrocinétique entre les ions du fluide et les parois capillaires. Ceci a été pour la première fois observé par Quincke en 1859 dans un tube capillaire et le phénomène a été par la suite développé théoriquement par Helmholtz en 1879.

Dans un milieu poreux en présence d'un électrolyte, des réactions chimiques et physiques se produisent à l'interface entre le solide et le fluide. Le solide (par sa composition minérale) possède en général une charge électrique négative due à des substitutions isomorphiques de certains cations (Suski, 2005). Au cours de ces réactions, la surface chargée du solide perturbe la distribution des ions et des molécules de l'eau. Pour conserver la neutralité de l'ensemble, les molécules du fluide viennent se placer à proximité des surfaces chargées pour former une couche.



Cette couche porte le nom de double couche électrique. Elle est globalement constituée, comme le montre la figure 3.1, de deux zones :

- une couche dite compacte, où les ions adhèrent à la paroi du solide,
- une couche dite diffuse, où les ions sont potentiellement mobiles (Dana, 2006). Cette couche contient un excédent d'ions positifs.

Dans les conditions statiques, le milieu saturé est donc électriquement neutre avec un équilibre de charge à l'interface solide-fluide. Cet équilibre est perturbé avec la présence d'un écoulement. Lorsque le fluide est en mouvement, ces ions positifs sont entraînés et engendrent ainsi un courant électrique, dit *courant électrique de convection*. Ce courant est équilibré par un courant de conduction (loi d'Ohm), et il en résulte une différence de potentiel électrique. On parle de *potentiel d'électro-filtration* ou *potentiel électrocinétique*.

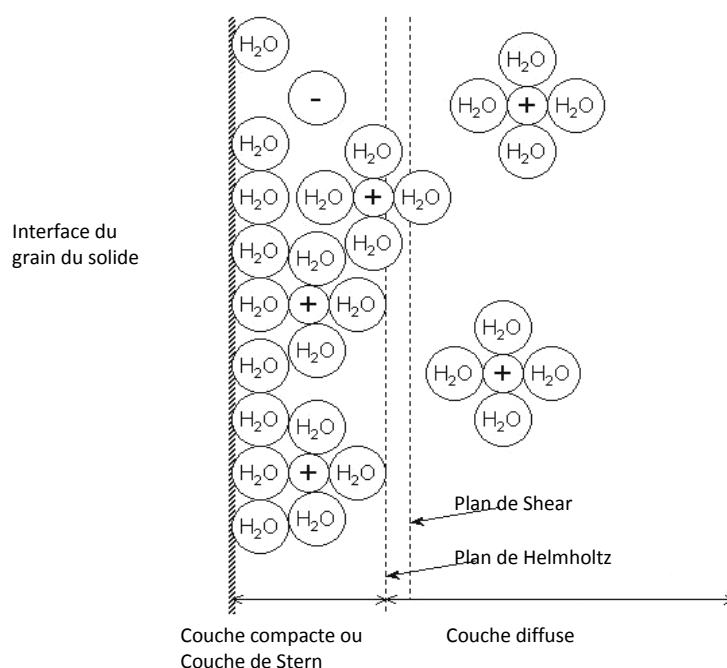


Figure 3.1: Représentation de l'interface solide-fluide adapté de Hibbert (1993) et tiré de (Sheffer, 2002)

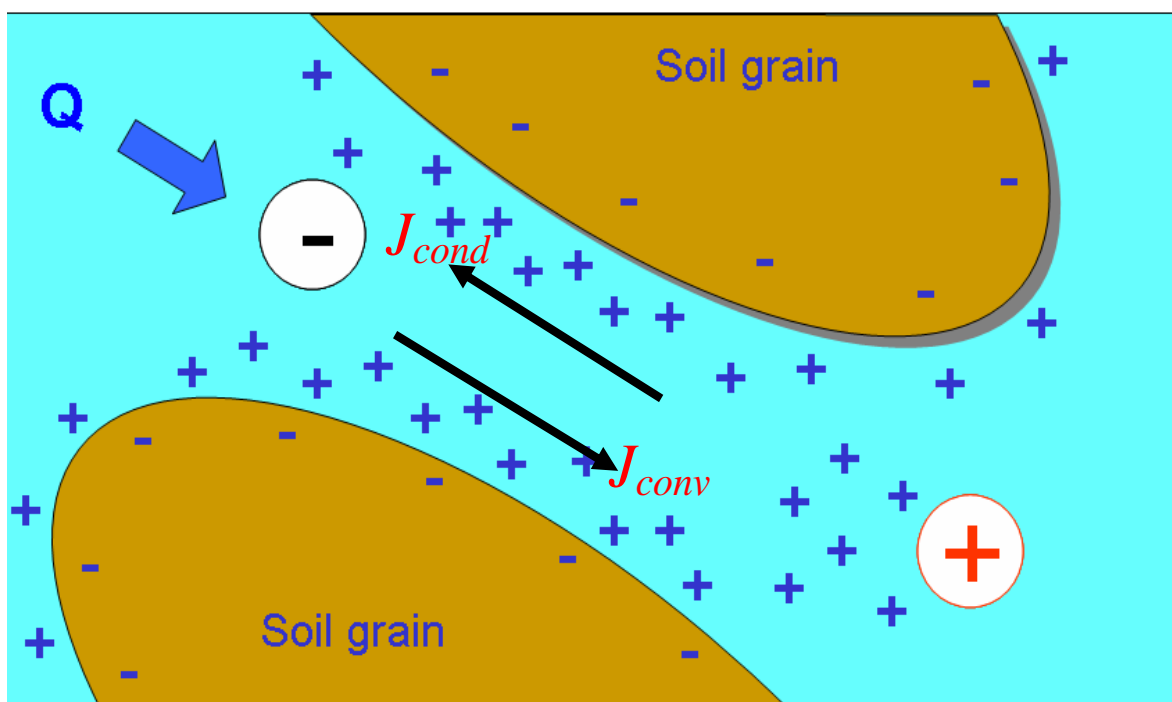


Figure 3.2: Représentation schématique de la géométrie de la double couche électrique. Lors de l'écoulement, certains ions de la surface diffuse de la double couche sont transportés, générant un courant électrique de convection (Ganesh, 2006).

### 3.2 THÉORIE DU FLUX COUPLÉ

Dans le milieu poreux, le phénomène d'électro-filtration met en évidence la présence d'un flux électrique et d'un flux hydraulique. Communément, la Loi de Darcy est utilisée pour décrire l'écoulement du fluide dans un milieu poreux causé par un gradient hydraulique. D'autres lois physiques telles que l'électro-osmose et la thermo-osmose sont définies pour caractériser les flux induits par la présence d'autres gradients y existant. En général, ces flux n'opèrent pas indépendamment dans le système et leur interaction peut être expliquée par la théorie des flux couplés.

Ainsi, le gradient électrique, thermique ou chimique peut engendrer un flux hydraulique; par la même occasion, un gradient hydraulique contribue à la génération d'un flux de courant, de concentrations chimiques ou de température. Le tableau 3.1 fournit un résumé des interactions qui se développent dans un système donné, considéré comme localement homogène.

Tableau 3.1: Forces et Flux couplés adapté de Wurmstich (1995), Sheffer (2002)

		<b>Forces</b>			
<b>Flux</b>		Gradient Électrique	Gradient Hydraulique	Gradient de Température	Gradient Chimique
	Électrique	<b>Loi d'Ohm</b>	Effet Électrocinétique	Électro- diffusion	Effet de Seebeck
	Hydraulique	Électro- osmose	<b>Loi de Darcy</b>	Thermo- osmose	Chimi- osmose
	Température	Effet Peltier	Filtration thermique	<b>Loi de Fourier</b>	Effet Dufour
	Ionique	Électrophorèse	Ultrafiltration	Effet Soret	<b>Loi de Fick</b>

La théorie des flux couplés est basée sur la théorie de la thermodynamique irréversible. Elle est utilisée dans la littérature pour relier ces différents phénomènes d'écoulement. La forme générale de l'équation les régissant est décrite par

$$J_i = \sum_j C_{ij} X_j \quad (3.1)$$

où  $J_i$  est la densité du flux du type  $i$ ,  $X_j$  est la force extérieure du type  $j$ ,  $C_{ij}$  est le coefficient de couplage qui établit le lien entre la circulation du flux de type  $i$  et la force du type  $j$ .

Vu la complexité qui entoure le phénomène du flux couplé, cette équation est généralement utilisée en négligeant certaines forces. En effet, l'importance du flux résultant dépend de l'importance relative du gradient et du coefficient de couplage correspondant de telle sorte que pour les processus suffisamment lents, le flux ne résulte pas seulement du gradient primaire, mais aussi du gradient secondaire.

Dans le cas du processus d'électro-filtration tel que considéré dans ce travail, seuls les gradients hydrauliques et électriques sont pris en compte, les gradients chimiques et thermiques sont négligés. Ceci réduit le système d'équations à

$$\begin{bmatrix} J \\ Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nabla V \\ \nabla H \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

où  $Q$  est la densité du flux hydraulique [m/s],  $J$  est la densité du courant électrique [A/m<sup>2</sup>],  $\nabla H$  est le gradient hydraulique,  $\nabla V$  est le gradient du courant électrique [V/m],  $C_{ij}$ , sont les coefficients de couplage appelés aussi coefficients de transport (i=1,2 et j=1,2).

On décrit ainsi la dépendance du flux hydraulique et du courant électrique des gradients hydrauliques et électriques. Dans ce système, les expressions  $(C_{11} \nabla V)$  et  $(C_{22} \nabla H)$  représentent respectivement les lois d'Ohm et de Darcy; le coefficient  $C_{12}$ , l'effet électrocinétique et le coefficient  $C_{21}$ , l'effet électro-osmotique. Les coefficients  $C_{12}$  et  $C_{21}$  sont généralement considérés égaux afin de respecter la relation de réciprocité d'Onsager.

La conduction du courant électrique s'effectue dans la double couche formée (couche compacte et couche diffuse) (cf. paragraphe 3.1). Lorsque l'épaisseur de cette double couche est plus petite que la taille typique des grains, les coefficients de transport sont considérés égaux à

$$C_{11} = \sigma \quad (3.3)$$

$$C_{12} = C_{21} = - \frac{\varepsilon \zeta}{\eta F} \quad (3.4)$$

$$C_{22} = \frac{k}{\eta} \quad (3.5)$$

où  $k$  désigne la perméabilité intrinsèque du milieu [m<sup>2</sup>],  $\eta$  désigne la viscosité du fluide [Pa s],  $\varepsilon$  désigne sa constante diélectrique [F/m],  $\zeta$  représente le potentiel Zéta [V],  $\sigma$  désigne la conductivité du milieu poreux [S/m],  $F$  est le facteur de formation électrique du milieu poreux, soit le rapport entre la conductivité électrique du fluide et la conductivité effective du sol saturée par ce fluide (Revil *et al.*, 1999 b).

### 3.3 CAS D'APPLICATION DU POTENTIEL D'ÉLECTROFILTRATION

Dans la littérature, l'utilisation de la méthode de polarisation spontanée pour caractériser les courants électriques générés dans le sol par les mécanismes hydraulique, thermique ou chimique,

a mené au développement de méthodes de calcul développées à des fins de modélisation et d'inversion (Berube, 2007; Sheffer, 2007). Ces techniques utilisent la théorie du potentiel couplé pour décrire la distribution du potentiel électrique dans le sol. Des interprétations qualitatives et quantitatives de différentes anomalies P.S. ont été suggérées (Haines, 1978; Ishido et Pritchett, 1999; Wurmstich *et al.*, 1991).

### 3.3.1 RÉOLUTION NUMÉRIQUE DES ÉQUATIONS DE LA P.S.

La méthodologie de résolution du système proposée par Sill (1981) et adoptée par plusieurs auteurs consiste :

- à résoudre le problème du potentiel primaire, c'est-à-dire la distribution des charges hydrauliques dans les sols,
- à calculer les sources de courant,
- à déterminer les potentiels électriques résultant.

L'équation du flux peut être découplée et analysée directement à partir de la Loi de Darcy (Sasitharan *et al.*, 2001). Cette hypothèse avait été admise par Mitchell (1991) qui rapporte cependant que la contribution du terme électro-osmotique dans les sols pour lesquels la conductivité hydraulique  $K > 10^{-9}$  m/s est négligeable. Dans le cas de l'étude d'un barrage, pour lequel on considère que des grands gradients hydrauliques sont imposés à la faible perméabilité des matériaux qui composent le noyau, une démarche découplée est très souvent utilisée. Cela permet d'exprimer la densité de flux hydraulique selon la Loi de Darcy

$$Q = -\frac{k}{\eta} \nabla H . \quad (3.6)$$

La résolution numérique de la densité de courant a été abordée selon deux approches. La première est l'approche du potentiel total adoptée par Nourbehecht (1963), puis par Fitterman (1978). Elle combine les deux potentiels en un pseudo potentiel, décrit par l'équation

$$J = -\sigma \nabla \Psi , \quad (3.7)$$

$$\text{où } \Psi = V + \frac{C_{12}}{\sigma} H . \quad (3.8)$$

La méthode du potentiel total résout  $\Psi$  à la surface du sol, et le rapporte au potentiel électrique en supposant que la charge hydraulique,  $H$ , est constante à la surface.

Dans une seconde approche, on considère le problème du flux électrique couplé, (Sill, 1983), en décrivant le flux en termes de courant de convection induit par le gradient primaire, et de courant de conduction résultant

$$J = J_{conv} + J_{cond} \quad (3.9)$$

De cette approche résulte la solution directe du potentiel électrique,  $V$ , (Sheffer, 2002)

$$J_{conv} = -C_{12}\nabla H, \quad (3.10)$$

$$J_{cond} = -\sigma\nabla V. \quad (3.11)$$

Dans l'hypothèse de l'absence de sources externes et du principe de continuité de la densité de courant ( $\nabla \cdot J = 0$ ), la relation entre les densités du courant de convection et du courant conducteur se réduit à

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (J_{conv} + J_{cond}) = 0,$$

$$\nabla \cdot (\sigma\nabla V) = -\nabla \cdot (C_{12}\nabla H), \quad (3.12)$$

$$\text{ou } \nabla \cdot (\sigma\nabla V) = -\nabla C_{12} \cdot \nabla H - C_{12} \nabla \cdot (\nabla H). \quad (3.13)$$

Le terme de droite dans l'équation 3.13 caractérise la densité de la source de courant volumétrique ( $A \cdot m^{-3}$ ). Il dépend de la localisation de la source de courant (Wurmstich *et al.*, 1991):

- Si elle est localisée où le coefficient de couplage change dans la direction du gradient de pression,  $\nabla C_{12} \cdot \nabla H \neq 0$  (type I).
- Si la source est une source d'écoulement du fluide, tel un puits,  $C_{12} \nabla \cdot (\nabla H) \neq 0$  (type II).

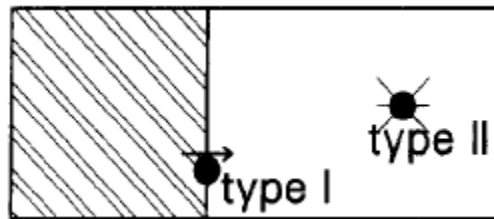


Figure 3.3: Courants de convection, sources des problèmes de potentiel d'électro-filtration adapté de Wurmstich et Morgan (1991).

On remarque ainsi que le coefficient de couplage, en occurrence le coefficient de couplage électrocinétique, joue un rôle dans la détermination de la source de courant. À cet effet, une discussion sur la valeur de celle-ci avait été faite, les résultats de ces travaux la situaient entre deux valeurs limites (Naudet, 2004; Suski, 2005):

$$\frac{\mathcal{E}}{\eta F \sigma_s} \leq \frac{C_{12}}{\sigma} \leq \frac{\mathcal{E}}{\eta \sigma_f}, \quad (3.14)$$

où  $\sigma_f$  et  $\sigma_s$  désignent respectivement la conductivité du fluide et de surface [S/m], et F le facteur de formation. La partie gauche de l'inégalité de l'équation 3.14 correspondant aux matériaux dont la conductivité de surface prédomine sur la conductivité du fluide et la partie droite, correspondant à la situation inverse. Ainsi, en présence de couches de silicates telles l'argile ou le mica et en présence d'un électrolyte très peu conducteur, la conductivité de surface (i.e. la conductivité de la double couche électrique) prédomine sur la conductivité du fluide. Si l'on néglige cette conductivité dans le milieu poreux et si en plus le coefficient de couplage  $C_{12}$  du sol est considéré constant, on peut simplifier l'équation 3.13 dans les considérations d'un régime permanent. Ces hypothèses sont validées pour une circulation capillaire laminaire, en absence de couches de silicates et pour un sol homogène (Suski *et al.*, 2008). Selon ces hypothèses, on se rapporte à la forme d'équation Helmholtz-Smoluchowski (Moore, 2007)

$$\Delta V = \frac{\mathcal{E}}{\eta \sigma_f} \Delta H. \quad (3.15)$$

Cette équation, qui date d'avant 2007 et qui met en évidence la proportionnalité entre le gradient du potentiel électrique et le gradient hydraulique, ne reproduit pas exactement le phénomène d'électrofiltration qui se rapporte à la polarisation spontanée. De ce fait, l'équation 3.13 reflète au mieux et est très souvent exploitée dans les modèles numériques. Pour l'étude des barrages en terre ou en enrochement, principalement des barrages comportant des fuites d'eau, l'équation 3.13 montre que la réponse de P.S. est associée à la localisation de la zone de fuite et de la zone de décharge; elle est aussi associée au changement dans le sol et au type de fluide (Wilt et Corwin, 1989).

### 3.3.2 EXEMPLES D'APPLICATIONS DE LA MÉTHODE P.S.

Wilt et Corwin (1989) ont utilisé le code 2D écrit par Sill en différences finies pour calculer les réponses d'anomalies P.S d'un modèle de barrage. Les auteurs ont étudié la réponse obtenue en fonction de la profondeur à laquelle se situerait la fuite, de la variation de l'anomalie avec le flux et de l'effet de changement du coefficient de couplage d'un sol à un autre. Les auteurs en déduisent que :

- La méthode de Sill offre une flexibilité dans la modélisation des données P.S.
- De manière quantitative et qualitative:
  - l'anomalie autour d'une fuite présente une polarité négative et celle autour d'un suintement, une polarité positive,
  - l'amplitude relative et la forme de l'anomalie dépendent essentiellement de la position de la source, de la distribution des paramètres et du débit. La variation de la profondeur affecte plus les anomalies négatives, la relation entre le débit et le voltage observés est difficile à cerner.

À partir des mesures faites en surface, Haines (1978), a suggéré que la délimitation des zones de fuite pourrait se faire facilement par la comparaison des mesures recueillies à différents moments pour des niveaux d'eau distincts. Il a déduit de ce fait que les zones de fuite apparaissent comme des pics positifs quand cette comparaison concerne les réponses P.S. prises à un niveau élevé par rapport celles prises à un niveau bas.

Al-Saigh *et al.* (1994), ont aussi présenté l'applicabilité de la méthode P.S. pour la détection des fuites d'eau. La formulation qui avait été utilisée par Al-Saigh et les résultats de Wilt et Corwin rejoignent la formulation de l'équation 3.15. Ils en déduisent ainsi que la constante de proportionnalité dépend :

- de l'hétérogénéité du sol,
- de la résistivité des fluides dans les pores,
- de la permittivité diélectrique,
- de la viscosité du fluide dans les roches,
- de la taille des grains,



- de la taille de la fracture,
- de la forme et de la tortuosité du chemin d'écoulement,
- du potentiel Zéta.

Analytiquement, des équations ont été développées pour déterminer les réponses de polarisation spontanée, notamment pour un contact vertical (Fitterman, 1979), pour un contact horizontal (Roy et Chowdhury, 1959), et pour détecter et évaluer les fractures horizontales (sous forme de cylindre fini) dans un barrage en terre (Rozycki *et al.*, 2006).

De façon complémentaire, la modélisation directe du phénomène d'électro-filtration a été envisagée. Notamment l'évaluation de la distribution de la P.S. résultant de la circulation hydraulique dans un milieu saturé ou non saturé à géométrie complexe a été réalisée par Sheffer et Oldenburg (2007), avec l'approche des volumes finis. En éléments finis, Bérubé (2007) modélise le potentiel spontané généré à travers de réelles conditions géologiques in-situ en considérant que la circulation hydrique est définie par la distribution de la conductivité hydraulique. Bolève *et al.* (2007) valident une nouvelle formulation (Revil et Leroy 2004; Revil *et al.* 2005a) pour calculer la réponse de polarisation spontanée associée à l'écoulement souterrain notamment dans les conditions de non saturation et pour quantifier les fuites dans le barrage en termes de débit d'écoulement. Dans cette formulation, la densité de courant est directement liée à la vitesse de l'eau (intrinsèquement au flux hydraulique) et à l'excès de charge électrique par unité de volume du pore dans la matière poreuse. Ceci reformule l'équation 3.12 :

$$\nabla(\sigma \nabla V) = -\nabla(Q_v u) \quad (3.16)$$

où  $u$  est la vitesse de Darcy de l'écoulement [m/s].

Le coefficient de couplage  $C_{12}$  du système d'équation équivaut à

$$C_{12} = -\frac{Q_v k_r K_s}{\eta} , \quad (3.17)$$

avec  $Q_v$ , l'excès de charge de la couche diffuse par unité de volume des pores [ $C \text{ m}^{-3}$ ] (qu'ils évaluent expérimentalement à partir de la mesure du coefficient de couplage électrocinétique),  $k_r$ , la perméabilité relative,  $K_s$ , la conductivité hydraulique à la saturation (Boleve *et al.*, 2007;

Revil *et al.*, 2007). L'une des avantages que l'on peut tirer de cette expression pourrait être la représentation d'une zone d'écoulement par rapport aux charges électriques qui y circulent.

### 3.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons fait un rappel du phénomène d'électro-filtration et de la théorie liée au phénomène de flux couplé. Le modèle est restreint à une circulation capillaire laminaire dans un milieu poreux, en absence de couches de silicates. Le phénomène a été présenté du point de vue physique à l'échelle d'un pore et du point de vue mathématique en termes d'équations révélant la liaison entre le flux hydraulique et le flux électrique dans un milieu poreux.

Il en résulte que:

- un gradient hydraulique peut induire des courants électriques à travers le phénomène d'électro-filtration,
- le phénomène d'électro-filtration est relié à la présence d'une double couche électrique à l'interface solide-fluide,
- le flux hydraulique dans le système est découplé et est représenté par la Loi de Darcy,
- l'étude du barrage en terre ou en enrochement est faite sous un régime permanent. Une nécessité se fait ressentir pour des mesures variables dans le temps et des mesures enregistrées avec une variation remarquable du niveau de l'eau,
- la variation du potentiel avec le niveau de l'eau offre une prospection quantitative des anomalies en termes de débit de fuite et/ou de perméabilité des sols.

Dans la même optique que celle des applications des auteurs précités, nous nous proposerons donc de valider les limites de l'application de la méthode P.S. en incorporant dans notre modélisation des structures et les caractéristiques physiques résultant des interprétations de mesures de terrain.

## **Chapitre 4 APPLICATION RÉALISÉE SUR LE SITE D'ÉTUDE**

### **4.1 MISE EN CONTEXTE**

#### **4.1.1 PRÉSENTATION DU SITE**

Les barrages en remblai Les Cèdres et St-Timothée se localisent entre les régions de Beauharnois et de Salaberry-de-Valleyfield, le long du Fleuve Saint-Laurent (Québec, Canada). Le barrage Les Cèdres, d'environ 12 m de hauteur, possède un noyau latéral (masque amont) argileux et le barrage St-Timothée, d'environ 9 m de hauteur, un noyau central argileux. Ils ont été construits à différentes dates, le premier en 1914, puis reconstruit en 1917 et le second en 1971. Ce dernier avait été construit pour des considérations environnementales afin de créer un réservoir en aval du barrage Les Cèdres. Pour le construire, une partie du barrage Les Cèdres avait été excavée. Cette excavation atteignit l'étanchéité qui était assurée par un batardeau ("crib de bois") de 5m de hauteur, installée en aval du barrage Les Cèdres. Par injection, les joints séparant les deux barrages ont été remplis d'un coulis dont la mixture était essentiellement composée de ciment. Le site d'étude est composé des deux barrages-digues et du réservoir (le réservoir St-Timothée). Une vue en plan des deux barrages à leur jonction est présentée sur la figure 4.1.

#### **4.1.2 PROBLÉMATIQUE DU SITE ÉTUDIÉ**

Dans le cas de ces barrages, règne un problème d'écoulement d'eau due probablement à la présence de renards dans les barrages. La fuite est connue depuis longtemps et les infiltrations ont été observées depuis la mise en eau du réservoir. Le flux total de fuite était d'environ 3 l/s en 1972. Il augmentait progressivement jusqu'à atteindre des valeurs de plus de 200 l/s selon des mesures prises pendant l'été 2009. Certains points de sortie de l'écoulement de l'eau sont visibles de part et d'autre du barrage St-Timothée (figure 4.1). Cependant les détails sur la construction du barrage sont peu connus.



**Figure 4.1: Vue en plan des barrages à leur jonction. Les sorties d'eau visibles sont représentées par les ellipses (orange et bleue). L'ellipse orange désigne la fuite visible lorsque le réservoir est vide.**

Les niveaux d'eau supérieurs en amont des barrages Les Cèdres et St-Timothée sont respectivement de 40.35 m et à 35.5m. Suivant ces niveaux, l'une des probabilités d'écoulement serait de l'amont du barrage Les Cèdres vers l'amont du barrage St-Timothée, puis de l'amont des barrages Les Cèdres et St-Timothée vers la partie aval des barrages. En plus, il n'est pas exclu la présence de réseaux de circulation.

#### **4.1.3 DIFFÉRENTES MÉTHODES APPLIQUÉES SUR LE SITE**

Nous avons introduit au chapitre 3 les différentes méthodes (destructives et non-destructives) qui sont très souvent utilisées pour détecter les écoulements d'eau. Pour le cas de ce site, la détection et l'évaluation des infiltrations d'eau ont été effectuées par les inspections visuelles, les essais géotechniques, les mesures de niveau d'eau dans les piézomètres, les mesures de débit d'infiltration aux déversoirs de jaugeage, la méthode thermique en plus de la polarisation spontanée.

En 2007, 2008, 2009 et 2010 des mesures de polarisation spontanée, de résistivité électrique et de magnétométrie ont été effectuées avant, pendant et après la vidange du réservoir St-Timothée (au

mois de novembre), puis pendant sa mise en eau (au mois d'avril)<sup>3</sup> (Giroux et Rivard, 2008; Nzumotcha T. *et al.*, 2010a). L'intérêt étant porté à la méthode de polarisation spontanée, les acquisitions réalisées avec la variation contrôlée du niveau d'eau dans le réservoir sont faites afin de mettre en évidence le mécanisme d'électro-filtration. Ceci permet de discriminer les sources possibles de potentiel spontané, de réduire voire éliminer leurs effets; en particulier ceux qui pourraient être constants. De plus, des ajouts ont été apportés au protocole traditionnel d'acquisition de mesures de polarisation spontanée.

Dans le souci de mieux comprendre comment ce potentiel se manifeste sur les mesures acquises, nous présenterons à la suite du paragraphe comment les différentes sources du potentiel varient en amplitude et en signe. Par la suite, le protocole de mesures des principales méthodes géophysiques utilisées (P.S. et résistivité électrique) est détaillé, suivi des résultats pertinents déduits des mesures antérieures (2007 et 2008) et des résultats obtenus au cours des 2 dernières années.

#### 4.1.4 AMPLITUDE ET SIGNE DES DIFFÉRENTS POTENTIELS

Le tableau 4.1 résume les caractéristiques permettant de qualifier et de quantifier les différents potentiels concourant au potentiel total mesuré par la méthode P.S. Il remanie les informations tirées du mémoire de Gloaguen (2000) qui présente en détail la manifestation de ces potentiels.

**Tableau 4.1: Signe et amplitude des différentes sources de potentiel P.S.**

Potentiel	Principal mécanisme associé	Signe et amplitude de l'anomalie
Potentiel de minéralisation	Effet électrochimique avec présence d'un métal électriquement conducteur	Négatif, jusqu'à plusieurs centaines de mV
Potentiel de diffusion	Phénomène électrochimique avec déplacement ionique et présence de diffusion	Négatif et/ou positif, jusqu'à plusieurs centaines de mV

<sup>3</sup> Pour des questions de clarté, il est important de mentionner les périodes importantes sur le site. Chaque année, la vidange du réservoir St-Timothée s'effectue pendant le mois de novembre et la mise en eau pendant le mois d'avril.

**Tableau 4.2: Signe et amplitude des différentes sources de potentiel P.S. (Suite)**

Potentiel de Nernst	Phénomène électrochimique à déplacement ionique négligeable	Positif, jusqu'à plusieurs dizaines de mV
Potentiel d'absorption	Phénomène électrochimique avec absorption d'ions par la membrane chargée du corps immergé	Négatif et/ou positif, jusqu'à plusieurs centaines de mV
Potentiel de végétation	Phénomène lié à la rétention de l'eau dans les racines des plantes	Négatif, jusqu'à plusieurs centaines de mV
Potentiel thermoélectrique	Effet Soret : Diffusion des ions sous l'action d'un gradient de température régnant dans le milieu poreux	Négatif et/ou positif, variant de quelques dizaines à quelques volts
Potentiel d'électro-filtration	Génération du courant due à la circulation du fluide	Négatif et/ou positif, jusqu'à plusieurs dizaines de mV

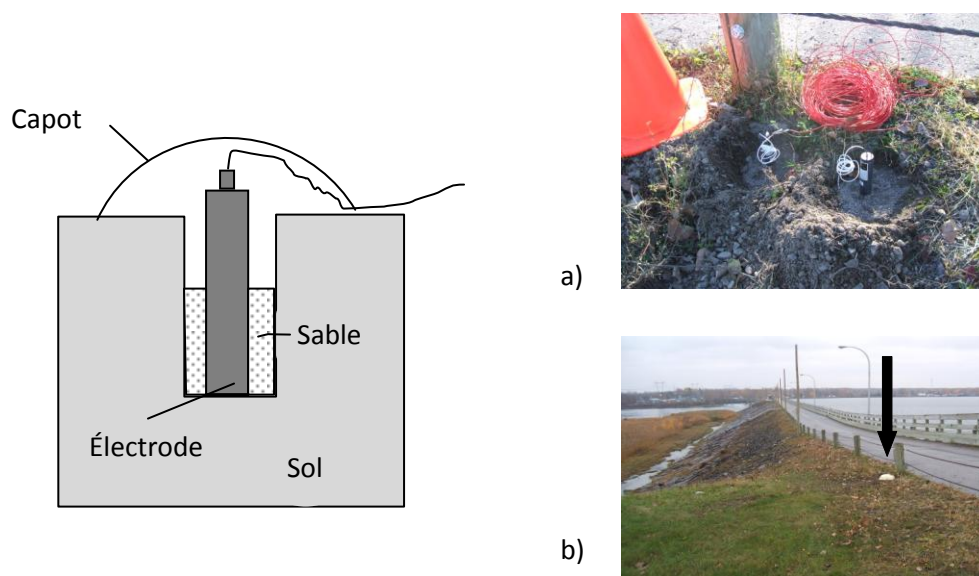
## 4.2 PROTOCOLE DES MESURES GÉOPHYSIQUES RÉALISÉES

### 4.2.1 PROTOCOLE DES MESURES DE POLARISATION SPONTANÉE

Le matériel d'acquisition des mesures est simplement composé :

- des électrodes non polarisables (PMS 9000 de la société française SDEC)
- du résistivimètre SAS 4000 (ou SAS 1000) de la société ABEM.

L'électrode non polarisable est implantée dans le sol de manière à bénéficier d'un bon couplage avec le terrain. Avec un contact plus ou moins lisse avec le sol, l'électrode est soutenu avec du sable et est recouvert d'un capot afin d'assurer une stabilité et de minimiser les effets externes possibles comme les mouvements dus à la présence de vent ou les infiltrations aux alentours en cas de pluie. La figure 4.2 illustre le schéma d'implantation des électrodes.



**Figure 4.2:** Schéma d'implantation des électrodes; a) Électrodes dédoublées, b) Électrodes mise en place

Le voltage obtenu est acquis entre deux électrodes dont l'une est considérée comme électrode de référence. Deux façons traditionnelles de prendre les mesures sont relatées dans la littérature: la configuration du gradient et la configuration à base fixe.

Pour la configuration du gradient, la paire d'électrodes se déplace simultanément d'un point de mesure à un autre. Cette méthode présente l'avantage d'être rapide, le transport et le rembobinage

des câbles sont évités. Les désavantages sont qu'il faut additionner toutes les différences de potentiel entre les deux électrodes pour obtenir la différence de potentiel  $\Delta V$ , les erreurs de zéro s'additionnent car les valeurs de potentiel cumulées peuvent changer au cours des mesures. De plus, il faut veiller à garder toujours la même polarité des électrodes.

La configuration à base fixe consiste à mesurer le potentiel entre une station mobile et une station de base fixe. L'électrode mobile est déplacée de façon à couvrir la surface d'investigation. Les avantages tirés de cette configuration sont que la lecture est directe puisque les mesures sont faites avec une même référence, et les erreurs de zéro entre les électrodes ne s'accumulent pas. Le désavantage principal est qu'on doit manipuler des fils pouvant être très longs. Il faut surveiller le branchement de ces fils pendant les mesures. Cette configuration a été adoptée pendant les mesures de terrain réalisées.

Afin de réduire l'impact dû au vieillissement des électrodes et pour réduire les effets externes tels les courants telluriques, des éléments ont été ajoutés au protocole classique d'acquisition des mesures. Ceci est décrit par :

- la mesure de la dérive à une paire d'électrodes de référence fixe, réalisée en 2008,
- la mesure de l'écart de voltage entre les électrodes mobiles et la référence, au début et à la fin des levés, effectuée pour tout l'ensemble des campagnes de mesures,
- la mesure de l'écart de voltage entre deux électrodes mobiles placées à une même position donnée et l'électrode de référence, réalisée en 2009.

### ***MESURE DE LA DÉRIVE DU POTENTIEL SPONTANÉ***

La mesure de la dérive consiste à mesurer les variations naturelles en une position donnée au fur et à mesure que les potentiels sont mesurés sur les profils. En d'autre terme, le potentiel spontané entre l'électrode de référence et une autre électrode est mesuré simultanément à l'acquisition de la P.S. le long des profils. Ceci permet de savoir la dérive naturelle du potentiel qui survient pendant la prise des mesures. De cette manière, on avait pu constater au cours des mesures prises en 2008 qu'il y a deux tendances de variation au niveau de la jonction : l'une étant lente de plus forte amplitude (de l'ordre de 5 à 6 mV) et l'autre rapide de l'ordre du millivolt.



### ***MESURE DE L'ÉCART DE VOLTAGE ENTRE LES ÉLECTRODES***

Afin de s'assurer que la mesure de polarisation spontanée effectuée correspond à un phénomène dans le sol, le voltage est mesuré indépendamment entre l'électrode de référence et chacune des électrodes mobiles en un même endroit. Cette mesure s'est effectuée en installant les électrodes dans un seau contenant l'eau du réservoir. On a pu constater des variations de l'ordre de 3 mV. La valeur pour chacune des électrodes a été soustraite de la valeur du potentiel total obtenue aux positions de mesures.

### ***MESURE DU VOLTAGE DES ÉLECTRODES DÉDOUBLÉES***

Enfin, les électrodes ont été dédoublées : le voltage est mesuré entre deux électrodes très peu espacées (environ 30cm, figure 4.2a). Ceci avait été effectué afin d'évaluer la qualité de la valeur observée du potentiel. En effet, une faible différence permettrait d'apprécier la reproduction de la mesure indépendamment de l'électrode spécifiquement utilisée.

La figure 4.3 présente les résultats obtenus à la jonction des barrages Les Cèdres et St-Timothée pour chacun des couples d'électrodes dont la localisation est illustrée sur la figure 4.4. Pour un couple, le voltage est mesuré successivement sur un intervalle de temps d'environ 5 minutes. La valeur du potentiel pour un couple d'électrodes n'est pas tout à fait la même. Ceci s'explique par le fait que les électrodes ne sont pas placées dans les mêmes conditions. D'une part, le potentiel n'est pas mesuré au même moment puisque cinq minutes séparent les différents temps d'acquisition. D'autre part, les électrodes ne sont pas positionnées précisément au même endroit (figure 4.2 a). Aux positions de mesures des couples d'électrodes (E15, E5), (E7, E17), (E8, E18) et (E13, E11), les variations sont de l'ordre de 4 à 10 mV (figure 4.3).

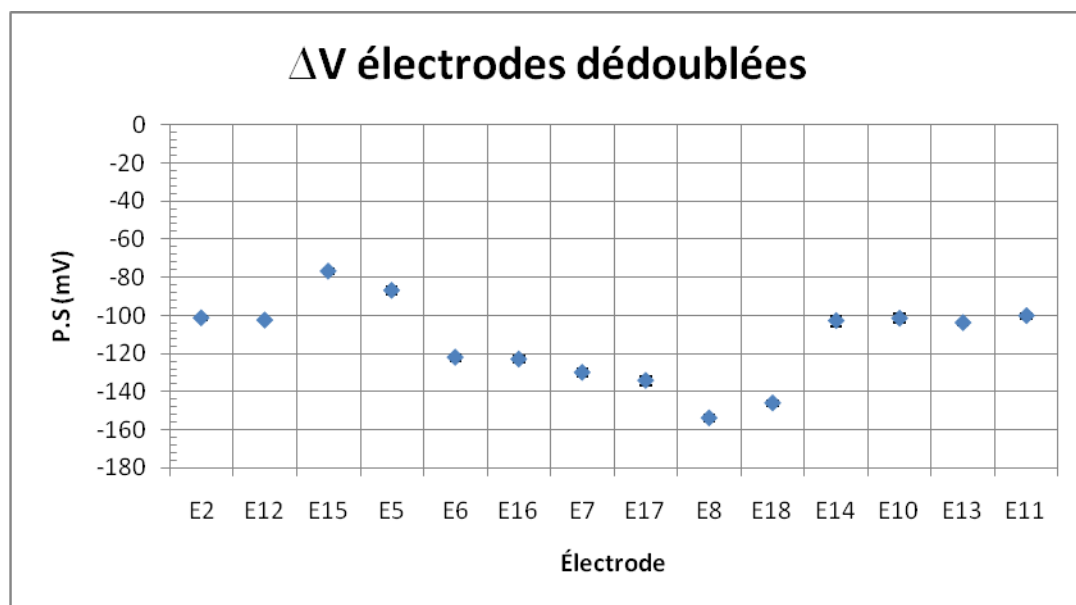


Figure 4.3: Voltage entre les deux électrodes mobiles placées à la même position et l'électrode de référence E1. Les électrodes dédoublées sont présentées l'une après l'autre.

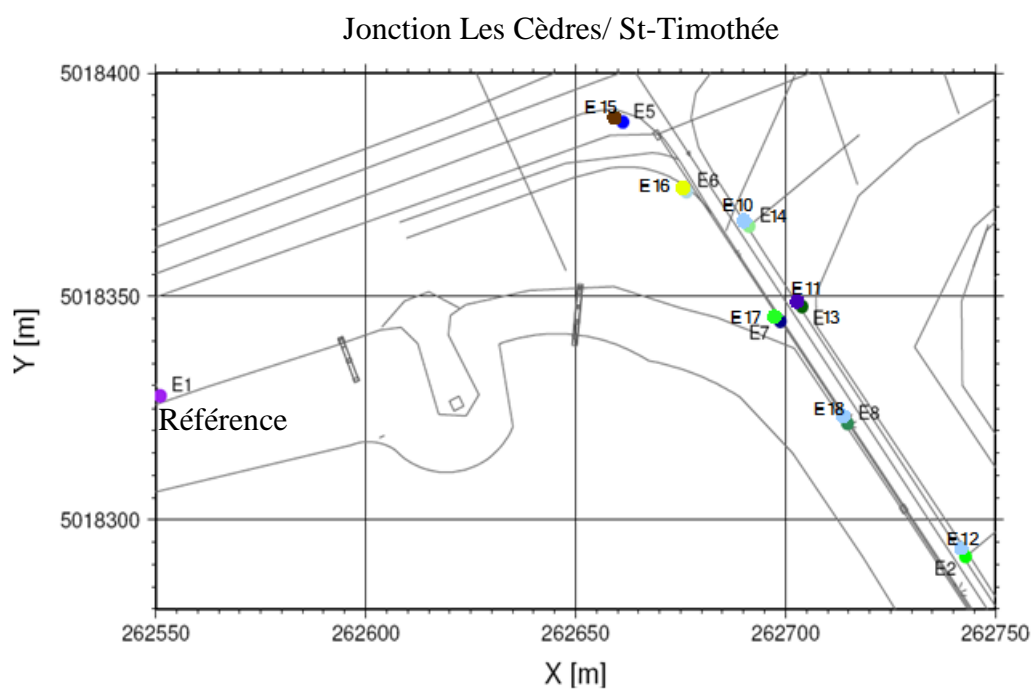


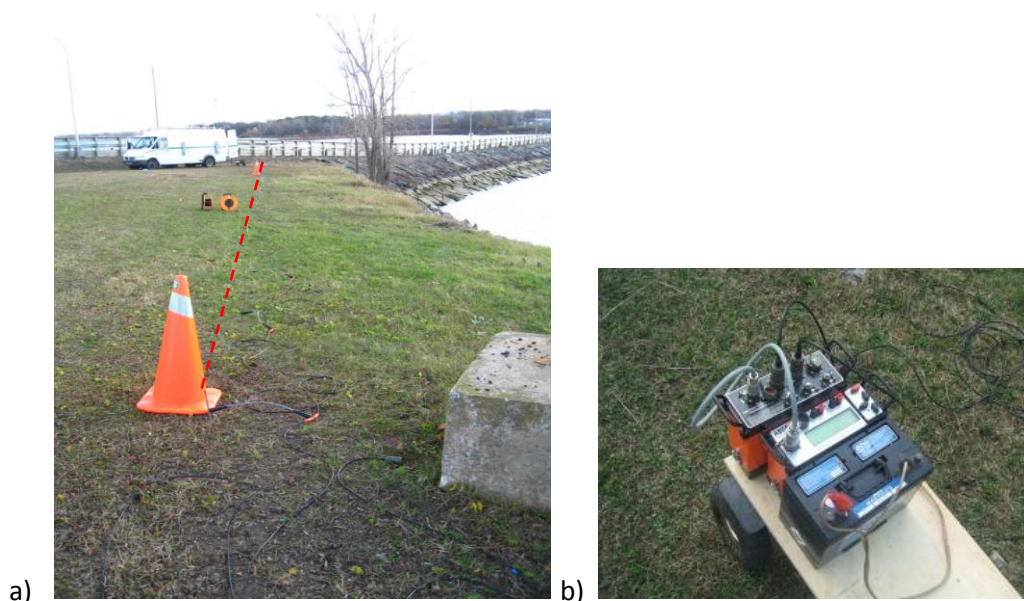
Figure 4.4: Position des électrodes dédoublées, E1 est l'électrode de référence.

### 4.2.2 PROTOCOLE DES MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

Le dispositif d'acquisition des mesures de résistivité électrique est composé

- des électrodes installées le long d'un profil considéré,
- des câbles qui assurent la connexion des électrodes au Lund Imaging Sys présenté par l'ES464 d'ABEM, lui-même relié à la centrale d'acquisition (résistivimètre SAS4000 d'ABEM) qui enregistre les résistivités apparentes mesurées,
- et d'une batterie qui fournit l'énergie nécessaire pour alimenter le système et permettre d'injecter le courant dans le sol (figure 4.5).

Le courant est transmis via deux électrodes dites dipôle émetteur et le voltage généré dans le sol est mesuré par deux autres électrodes jouant le rôle de dipôle récepteur. Les mesures s'effectuent suivant différentes configurations dont les plus couramment utilisées sont celles de Schlumberger, de Wenner et dipôle-dipôle. La centrale d'acquisition permet de choisir le dispositif désiré et contrôle la matrice de relais sur laquelle les câbles sont connectés. De cette manière, toutes les paires d'électrodes qui sont formées au cours de la mesure peuvent jouer le rôle de dipôle émetteur ou de dipôle récepteur.



**Figure 4.5: a) Profil d'acquisition des mesures, b) Appareil de mesure pour la méthode de résistivité électrique.**

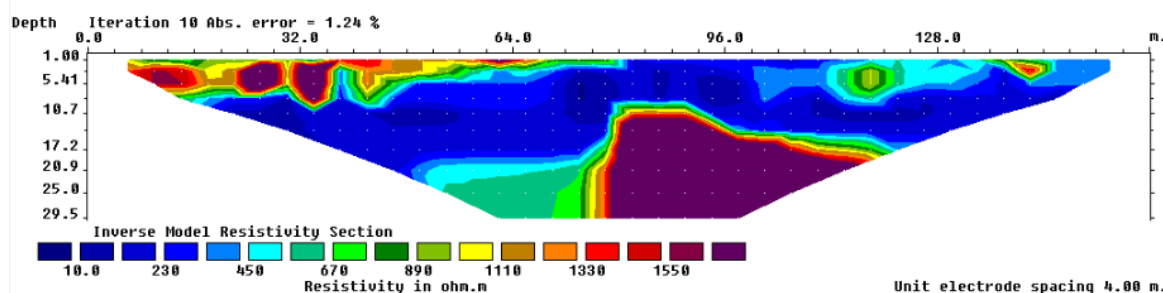
### 4.3 ÉTUDES ANTÉRIEURES ET PRINCIPAUX RÉSULTATS

Les premiers travaux de géophysique ont été réalisés par la compagnie Aquatrack, mandatée par Hydro-Québec. Par la suite, des campagnes de terrain ont été réalisées en octobre 2007 par l'équipe de l'École Polytechnique. Ces travaux mettaient en évidence les méthodes de résistivité électrique, de polarisation spontanée et de magnétométrie. Les données ont été complétées par d'autres mesures de polarisation spontanée et de résistivité électrique acquises en août, octobre, novembre 2008 puis en Novembre 2009. Parallèlement à ces méthodes géophysiques, les mesures de débit de fuite d'eau et des mesures par méthode thermométrique étaient effectuées par l'équipe de l'institut de recherche d'Hydro-Québec.

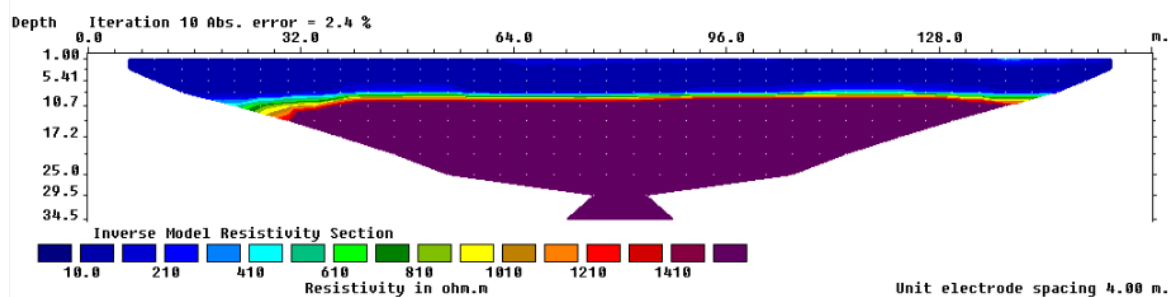
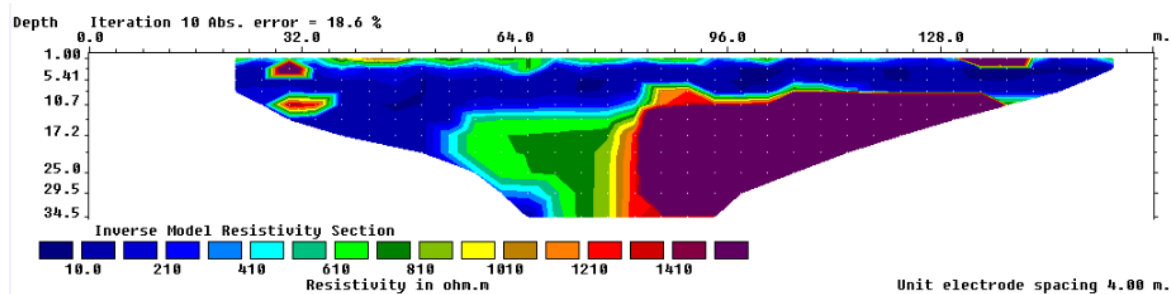
Les principaux résultats donnent des informations sur la conductivité électrique des sols à la jonction des barrages, sur les variations du potentiel spontané dans le temps (en fonction du niveau dans le réservoir St-Timothée) et dans l'espace (sur l'étendue de la zone d'investigation), la variation du débit de fuite et un estimatif de la profondeur de la fuite.

#### 4.3.1 RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

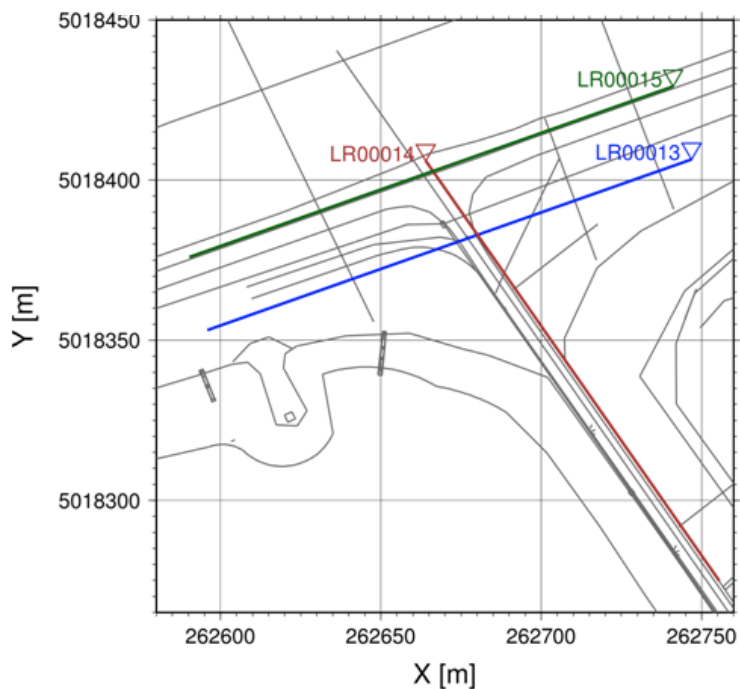
Les trois profils de tomographie électrique réalisés à la jonction étaient longs de 160m (figure 4.6d). La distance entre les électrodes était de 4m. L'un des profils (LR00014) était transversal aux deux autres. Les profils ont montré la présence d'une couche très conductrice (résistivité électrique d'environ 30 à 100  $\Omega\text{m}$ ) dès les premiers mètres de profondeur. L'épaisseur de cette couche tend à s'amincir de la jonction vers le barrage St-Timothée (Giroux et Rivard, 2008). Sur le profil LR00015, la zone conductrice semble corrélérer avec le noyau latéral du barrage Les Cèdres.



a) Profil LR00013



#### Jonction Les Cèdres/ St-Timothée



d) Position des profils de résistivité électrique

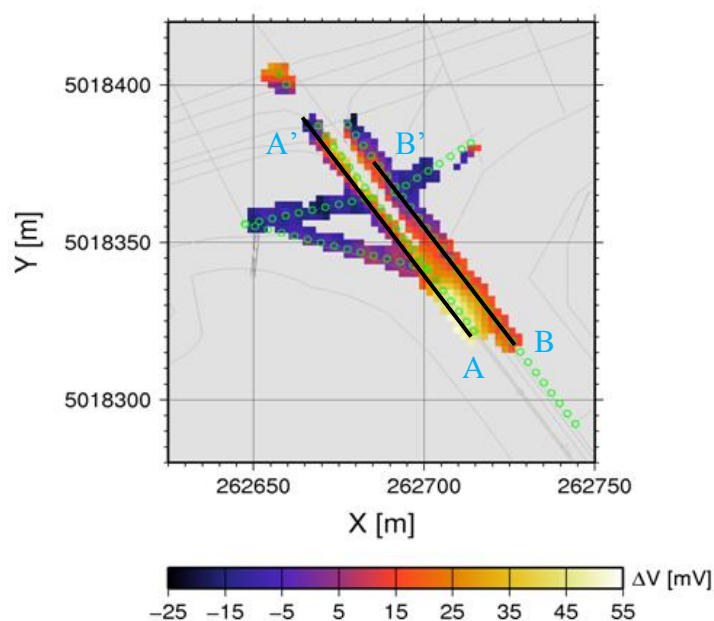
Figure 4.6: Tomographies électriques à la jonction en 2007 et Octobre 2008, adapté de (Giroux et Rivard, 2008).

### 4.3.2 POLARISATION SPONTANÉE (P.S.)

Les valeurs de potentiel présentaient une distribution négative à la jonction. Aux mêmes positions de mesure, le potentiel mesuré pour les trois périodes (octobre 2007, août 2008 et novembre 2008) semblaient différer de peu, moins de 5 mV de variation.

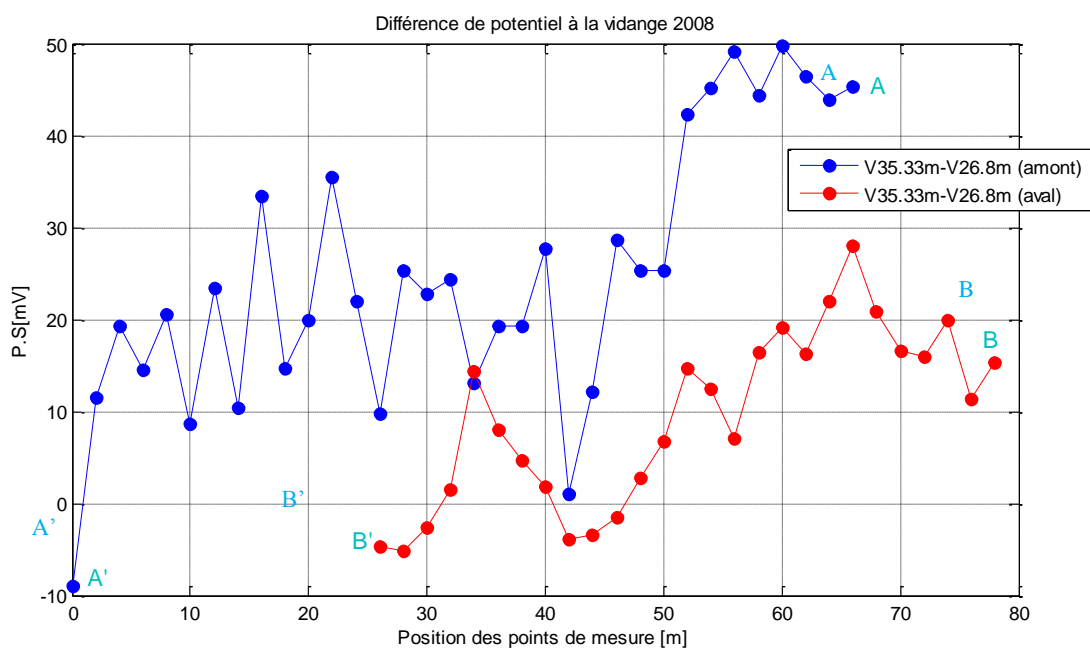
Pendant les mesures réalisées en août 2008, le niveau de l'eau dans le réservoir St-Timothée était de 35.33m. En novembre 2008, les mesures ont été acquises progressivement avec la vidange de l'eau dans le réservoir. Le niveau de l'eau le plus bas atteint à cette période était de 26.8m. Complémentairement aux données de novembre 2008, des mesures ont été prises en avril 2009, pendant la mise en eau du réservoir. Les mesures de potentiel à chaque position ont été répétées 20 à 30 fois, afin d'avoir une idée sur leur répétitivité. Les valeurs de potentiel acquises sur les profils ou les positions choisies de mesures représentées sur une carte font état de la distribution spatiale du potentiel.

De plus, pour avoir une idée sur la variation temporelle du potentiel, la différence des mesures entre les deux niveaux extrêmes avait été réalisée. Cette différence pour les données de 2008 (avant la vidange du réservoir,  $V_{35.33m}$ , et après sa vidange complète,  $V_{26.8m}$ ) montre d'une part une augmentation en valeur de l'anomalie P.S. le long du barrage St-Timothée et d'autre part une diminution sur les abords ( $\Delta V = V_{35.33m} - V_{26.8m}$ , avec  $V_{35.33m}$  et  $V_{26.8m}$  négatifs) (Giroux et Rivard, 2008).



**Figure 4.7: Différence de potentiel entre les niveaux 35.33m et 26.8m du réservoir St-Timothée, tiré de Giroux et Rivard, (2008)**

Les deux profils AA' et BB' extraits en amont et aval du barrage St-Timothée (cf. figure 4.7), distants d'environ 5m montrent globalement une même tendance avec des pics positifs à la fin des profils (figure 4.8).



**Figure 4.8: Différence de potentiel entre les niveaux 35.33m et 26.8m du réservoir St-Timothée représentée pour les profils AA' et BB' en amont et en aval cf. figure 4.7**

Le nombre de valeurs de potentiel prises en fonction du niveau de l'eau en novembre 2008 et en avril 2009 s'avérait être minime pour détailler les interprétations dans le temps et dans l'espace. Néanmoins, il avait été constaté des mesures faites à chaque position d'électrode que les valeurs de potentiel étaient décalées les unes par rapport aux autres, tout en illustrant une tendance linéaire pour un niveau d'eau compris entre 30 et 36m. Aux positions les plus proches de la jonction, une variation du potentiel avait été notée entre les niveaux 33 et 34m du réservoir St-Timothée correspondant au niveau supérieur du batardeau. Il a été émis l'hypothèse suivant laquelle les matériaux au-dessus de ce dernier seraient d'une grande perméabilité (Giroux et Rivard, 2008).

### **4.3.3 MAGNÉTOMÉTRIE**

L'étude magnétométrique avait été réalisée sur le site afin de déterminer la présence d'objets métalliques superficiels ou profonds sujets à corrosion; car ces derniers pourraient présenter une source de P.S. (cf. tableau 4.1).

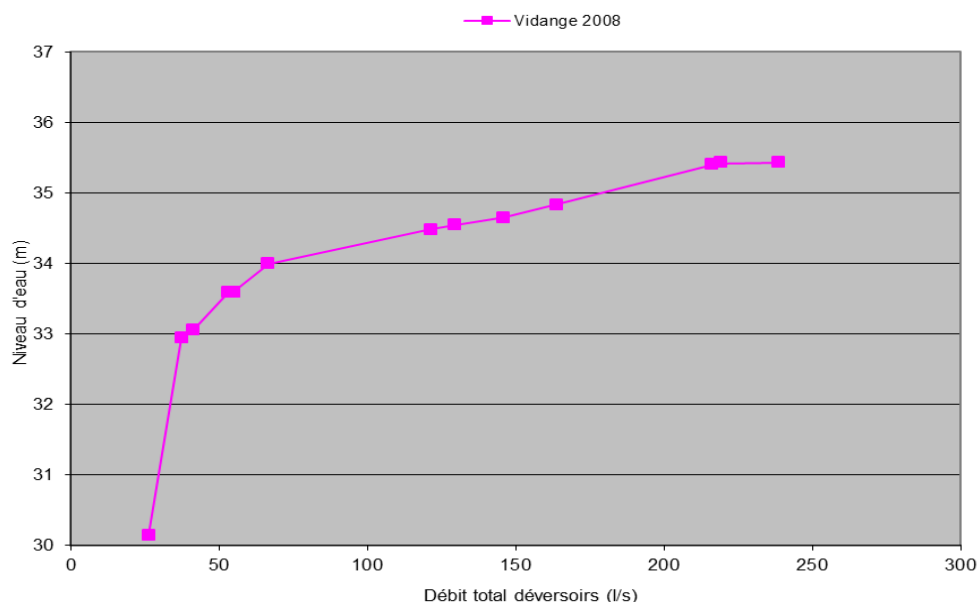
Les anomalies identifiées ont été corrélées à la présence de panneau de signalisation et de poteau métallique en surface. Par ailleurs, aucune corrélation n'a été observée avec les anomalies P.S. observées (Giroux et Rivard, 2007).

### **4.3.4 DÉBIT DE FUITE**

Le débit total à la jonction résulte de deux débits mesurés à deux positions différentes, l'une sur le barrage Les Cèdres et l'autre sur le barrage St-Timothée. Les observations de 2008 montraient un débit de fuite plus élevé du côté du barrage Les Cèdres que celui du barrage St-Timothée pendant la vidange du réservoir. Ces mesures ont permis de mettre en évidence le point d'inflexion lorsque le niveau de l'eau est de 33.5m. Pour ce niveau, le débit de fuite changeait de comportement. Plus haut, le débit total de fuite d'eau diminue de façon linéaire avec le niveau de l'eau dans le réservoir B. Plus bas, la variation tend à être constante indépendamment du niveau de l'eau dans le réservoir. Sur la figure 4.9, la variation du débit total avec le niveau de l'eau est présentée.



L'une des suppositions émise était que ce changement de forme du débit total s'effectuait probablement lorsque la charge correspondait à la cote du batardeau. Au-dessus de la cote, un écoulement proviendrait du réservoir amont du barrage Les Cèdres vers le barrage St-Timothée. Au-dessous de la cote et possiblement au-dessous du niveau 30 m, un écoulement permanent aurait lieu (Nzumotcha T. *et al.*, 2010b).



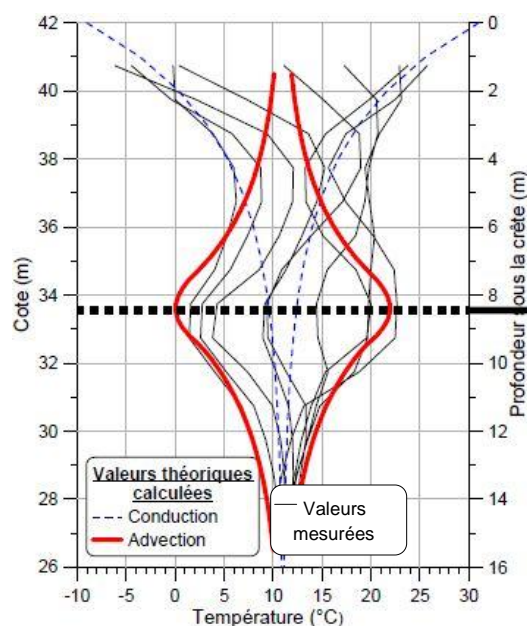
**Figure 4.9: Variation du débit total à la jonction**

### 4.3.5 THERMOMÉTRIE PASSIVE

Parallèlement, les mesures de thermométrie passive réalisées en forage orientaient les résultats dans le même sens que les observations faites de la mesure de débit de fuite. Une augmentation de la température dans le sol a été mesurée entre les élévations 33 et 34m (figure 4.10). La modélisation directe qui avait été associée pour une couche d'environ  $10^{-4}$  m/s de conductivité hydraulique centrée à 33.5m de profondeur, corrélait avec les mesures de terrain.

En effet, les mesures de thermométrie passive s'interprètent en termes de vitesse d'écoulement. Théoriquement, lorsque les vitesses sont faibles, les températures sont contrôlées par les courants de conduction. Les courants d'advection viennent changer le comportement thermique lorsque les vitesses d'écoulement (vitesse de Darcy) deviennent supérieures à  $10^{-7}$  m/s. De façon pratique, la

localisation des zones à haute vitesse d'écoulement s'effectue par comparaison. La comparaison est faite en termes d'amplitudes et de déphasage entre les températures mesurées dans le réservoir et dans le barrage (Smith *et al.*, 2009).



**Figure 4.10: Représentation des températures mesurées (traits noirs) et des températures calculées par modélisation numérique pour une couche de conductivité hydraulique  $10^{-4}$  m/s et centrée au niveau 33.5m. Résultats tirés de (Smith *et al.*, 2009).**

#### 4.4 OBJECTIF DU CHAPITRE

La réponse de polarisation spontanée pouvant être causée par plusieurs mécanismes (cf. chapitre 2), l'intérêt est porté sur la variation du potentiel due au phénomène d'électro-filtration lié à la présence d'écoulement. Avec cette logique, les mesures de P.S. ont été réalisées avec un changement contrôlé du niveau de l'eau dans le réservoir St-Timothée. La variation du niveau de l'eau dans ce réservoir engendre simultanément une variation du gradient de pression existant entre les trois différents réservoirs. On s'attend ainsi à ce que les variations du niveau de l'eau dans le réservoir St-Timothée influencent les variations du potentiel à la jonction. Les résultats antérieurs concourent à une même hypothèse: celle de la présence d'un chemin préférentiel au-dessus de la cote du batardeau et d'une probable élévation de perméabilité dans la fondation. La zone la plus ciblée au cours des mesures a donc été le niveau compris entre 33 et 34m.

#### 4.5 MESURES ET INTERPRÉTATIONS À LA JONCTION DES BARRAGES

Les opérations de vidange et de mise en eau du réservoir St-Timothée duraient en moyenne quatre jours avec des élévations d'eau oscillant entre 35.5m et 29.5m. Les niveaux en amont du barrage Les Cèdres et en aval du barrage St-Timothée sont stables et correspondent respectivement à environ 40.35m et 29.5m. La figure 4.11 illustre la localisation des électrodes de mesures et les profils de tomographies électriques réalisés. Parallèlement aux mesures (P.S. et de résistivité électrique), des opérations d'injection de coulis étaient planifiées à la jonction des barrages.



**Figure 4.11: Localisation des mesures à la jonction des barrages avec la position des profils de résistivité (réalisés en 2008 et 2009; le profil 1 est en bleu et le profil 2 en vert), la localisation des électrodes (l'électrode E1 est la référence) et les infiltrations visibles pendant la vidange et la mise en eau du réservoir St-Timothée sont indiquées par des ellipses.**



**Figure 4.12: Fuite d'eau visible en Amont du barrage St-Timothée (Réservoir vidé)**

### 4.5.1 RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE

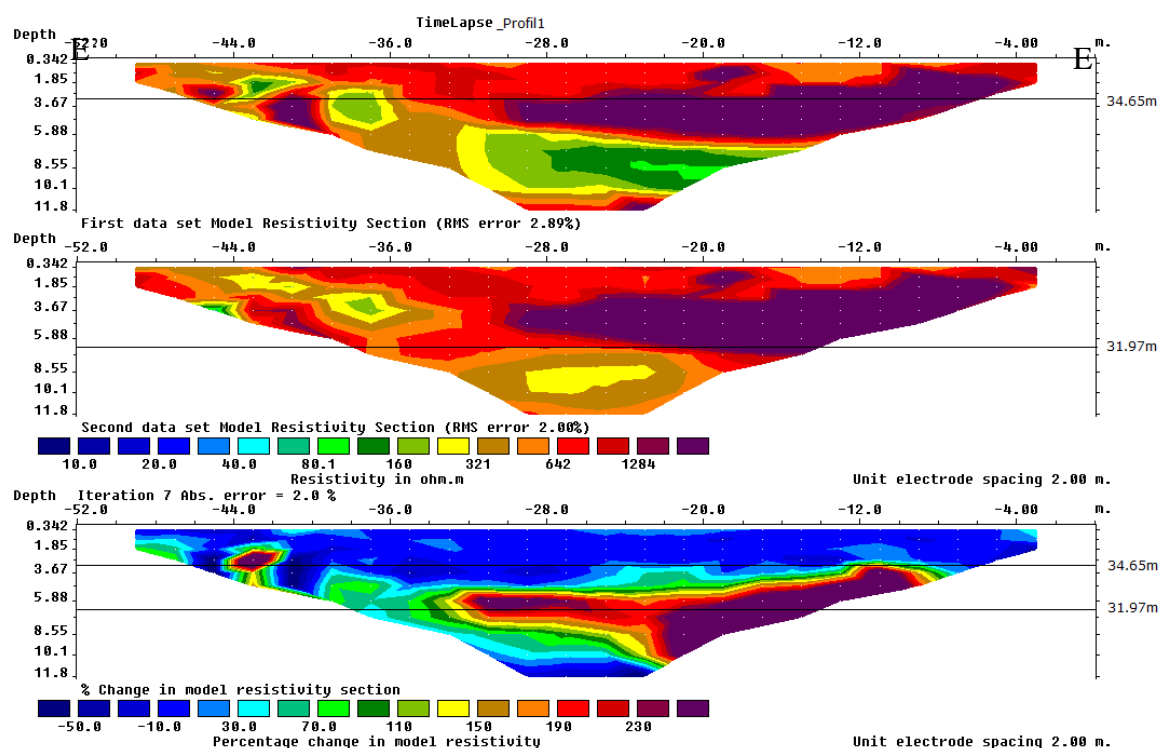
Afin d'établir une carte de distribution de la résistivité électrique des sols et de détecter les zones possibles reliées à la présence de fuite, nous avons réalisé un profil de tomographie électrique (ERT) pour chacune des journées de mesures. Les profils sont faits suivant la configuration dipôle-dipôle avec un espacement de 2 mètres entre les électrodes. Ils ont été positionnés particulièrement sur le haut de talus du barrage, en amont du barrage St-Timothée. À cet endroit, le personnel d'Hydro-Québec chargé du projet y suspectait une entrée d'eau; de plus, on pouvait y observer un suintement lorsque le réservoir était vide (figures 4.11 et 4.12).

Les données de tomographie ont été inversées avec le logiciel Res2DINV de Geotomo Software. Afin de s'attarder sur les variations visibles, lors du traitement des données, le suivi temporel ("time-lapse") des quatre mesures ERT prises pendant la vidange et la mise en eau du réservoir a été réalisé. Le suivi temporel consiste étudier la variation de la résistivité du sol en fonction du temps en comparant les modèles de résistivité obtenus par rapport au modèle du sous-sol au temps initial. Il nous permet ainsi d'interpréter les résultats en termes de variation de résistivité du fluide dans les pores et de saturation du sol. Les figures 4.13 et 4.14 présentent les résultats d'inversion pour la première et la quatrième journée et le suivi temporel représentatif en fonction du niveau de l'eau dans le réservoir. La position zéro sur les pseudo-sections coïncide avec le début des profils.

Les données topographiques du site affichent sur le profil1 (figure 4.11) des élévations variables entre 39.01 et 39.36 m de E' vers E. Celles concernant le profil2 (figure 4.11), oscillent dans la même direction entre 40.81, 40.72 et 40.12 m. La profondeur d'investigation atteinte n'a été que de 12m, vue l'écart entre les électrodes. Nous aurions pu avoir une image de résistivité d'une grande partie du socle sous les barrages avec des écartements plus grands. Néanmoins, les sections de résistivité au niveau du profil 1 montrent essentiellement la présence de deux grandes zones : l'une, résistante et l'autre conductrice (à partir de 5.88m de profondeur). La conductivité de la deuxième zone diminue graduellement avec le niveau de l'eau. On remarque sur les images que cette zone conductrice se localise un peu au-dessous du niveau de l'eau dans le réservoir (31.97m) atteint à la fin de la prise des mesures de résistivité. Le suivi temporel correspondant à la troisième image de la figure 4.13 montre qu'entre ces deux niveaux, il y a eu d'une part une

augmentation de la résistivité apparente en profondeur, d'autre part une diminution de la résistivité apparente sur les premiers mètres.

Suivant la loi d'Archie, une augmentation de la résistivité effective correspond aussi à une désaturation du sol. Ceci laisse croire par opposition que cette augmentation pourrait être associée à une désaturation progressive vu qu'un des réservoirs est en vidange, ou peut-être associée à un phénomène d'écoulement.



**Figure 4.13: Suivi temporel réalisé sur le profil1 à la vidange 2009.**

Entre ces deux niveaux au profil 2, le suivi temporel indique aussi des variations de résistivité à certains endroits (figure 4.14). Particulièrement, on observe une anomalie de résistivité à la position latérale  $x \sim -32$ . Ceci correspond approximativement au niveau d'eau 33.7m pour lequel l'infiltration principale voit son débit diminuer. Cette localisation coïncide aussi avec la position du suintement observée en amont du barrage St-Timothée (figure 4.12) entre les positions des électrodes E8 et E7. On note cependant que l'erreur RMS sur ce profil est élevée (environ 39.8%).

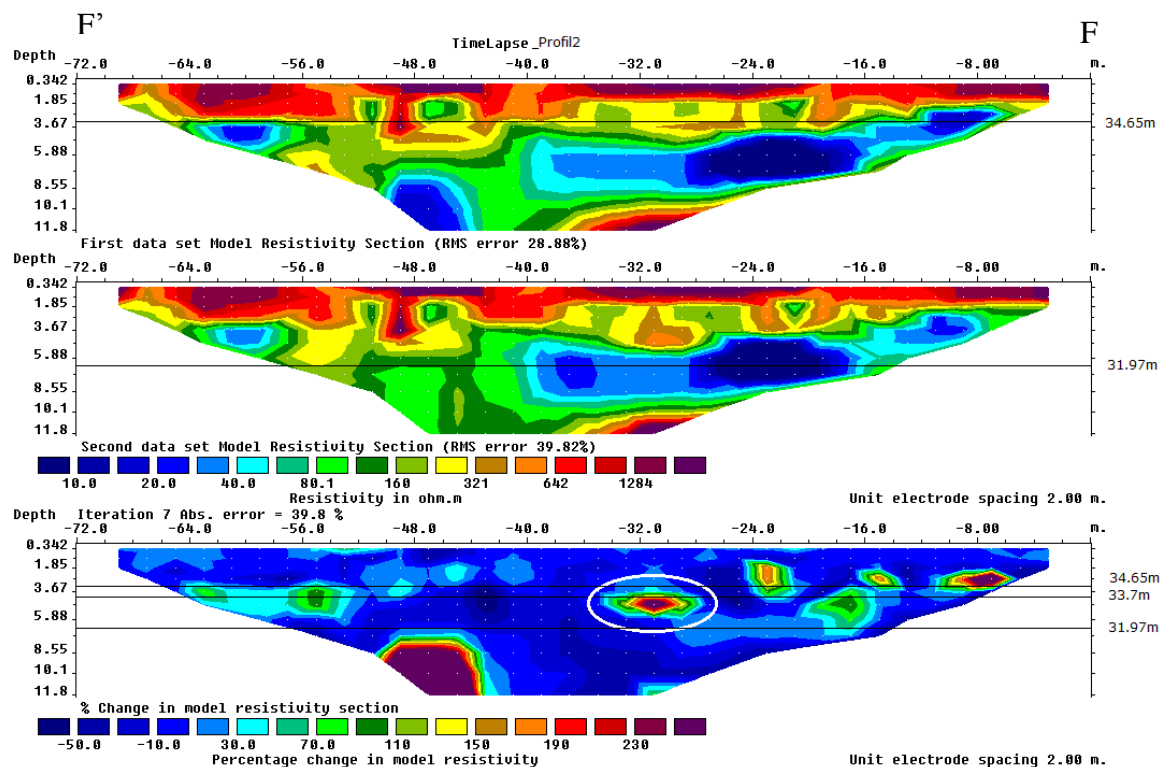


Figure 4.14: Suivi temporel réalisé au profil2 à la vidange 2009.

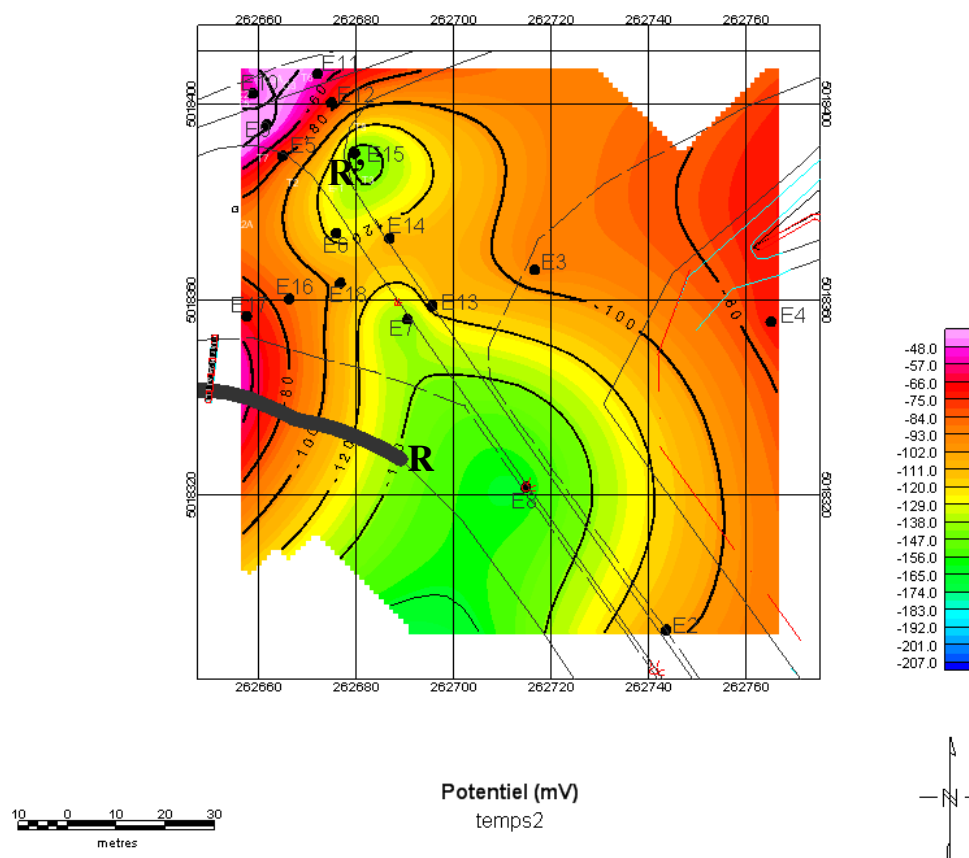
## 4.5.2 POLARISATION SPONTANÉE

L'acquisition des mesures P.S. a été effectuée suivant la configuration à référence fixe pour l'ensemble des campagnes. Le potentiel est mesuré progressivement d'une électrode à l'autre pour un intervalle de temps assez court (en moyenne 3 minutes par mesure). Durant les quatre jours de mesure, la mesure de l'écart de voltage entre l'électrode de référence et chacune des électrodes mobiles est l'élément du protocole d'acquisition qui a été constamment vérifié. Pour chacune des électrodes mobiles, l'écart de voltage observé est soustrait de la valeur de polarisation observée pendant les mesures afin de minimiser l'influence due à la dérive des électrodes.

Les résultats présentés dans ce paragraphe correspondent aux mesures réalisées en novembre 2009 et en avril 2010 pendant la vidange et la mise en eau du réservoir St-Timothée.

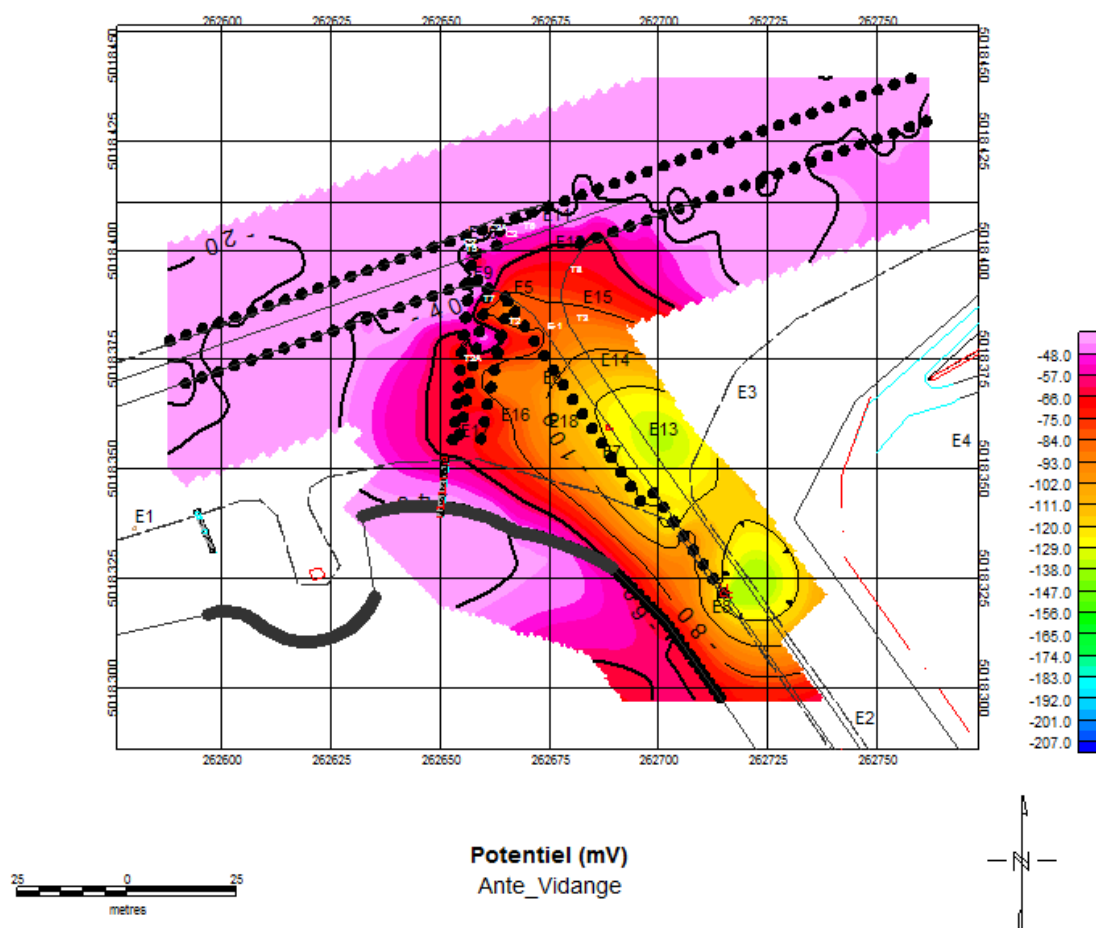
### a. À LA VIDANGE DU RÉSERVOIR

Pendant l'abaissement du niveau de l'eau dans le réservoir St-Timothée, le potentiel décroît en gardant une distribution spatiale similaire pour les quatre journées de mesure. D'une part, on constate une anomalie plus négative (moins de -100mV) qui longe le barrage St-Timothée. Cette anomalie augmente positivement vers l'aval du barrage et vers l'amont du barrage Les Cèdres. La figure 4.15 illustre la distribution du potentiel à la jonction des barrages pour le niveau d'eau 34.79m. Les données ont été interpolées aux 1m. Vu la distance entre les points de mesures, l'interpolation faite avec les calculs sur Oasis Montaj de Geosoft est un peu grossière, l'extension observée pourrait être ainsi différente si un grand nombre de positions de mesure avait été réalisé (c'est ce que l'on observe sur les figures établies à partir des mesures réalisées en 2008, figure 4.16).



**Figure 4.15: Distribution du potentiel à la jonction des barrages au début de la vidange 2009, niveau d'eau égale à 34.79m atteint le 03 Novembre 2009**

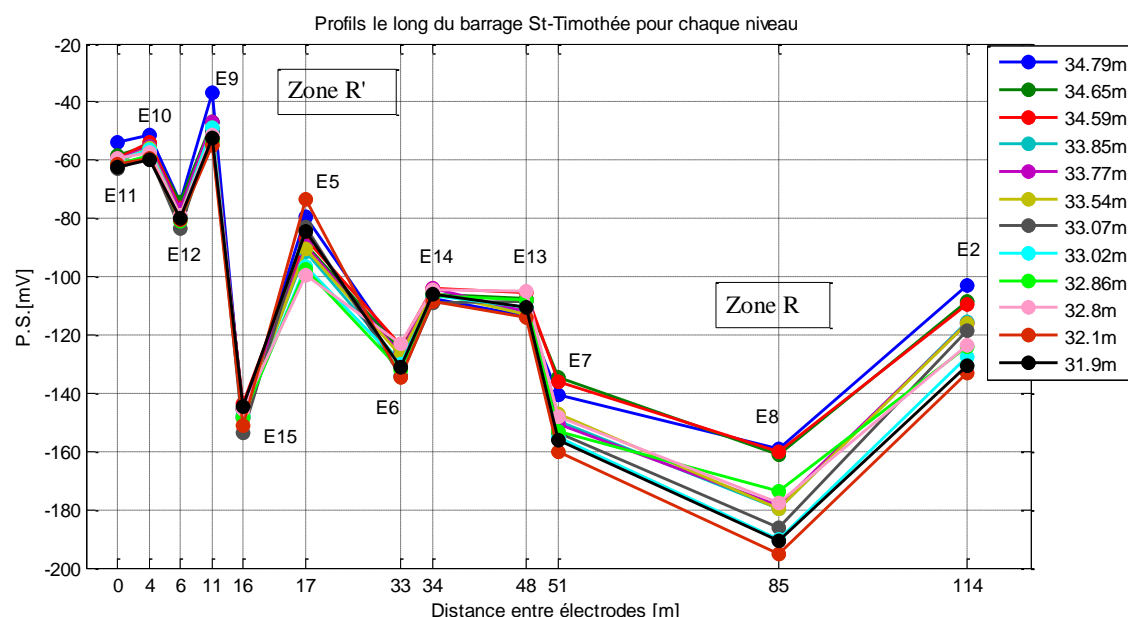




**Figure 4.16: Distribution du potentiel, avant la vidange complète du réservoir St-Timothée, niveau d'eau égal à 35.33m atteint le 15 Août 2008.**

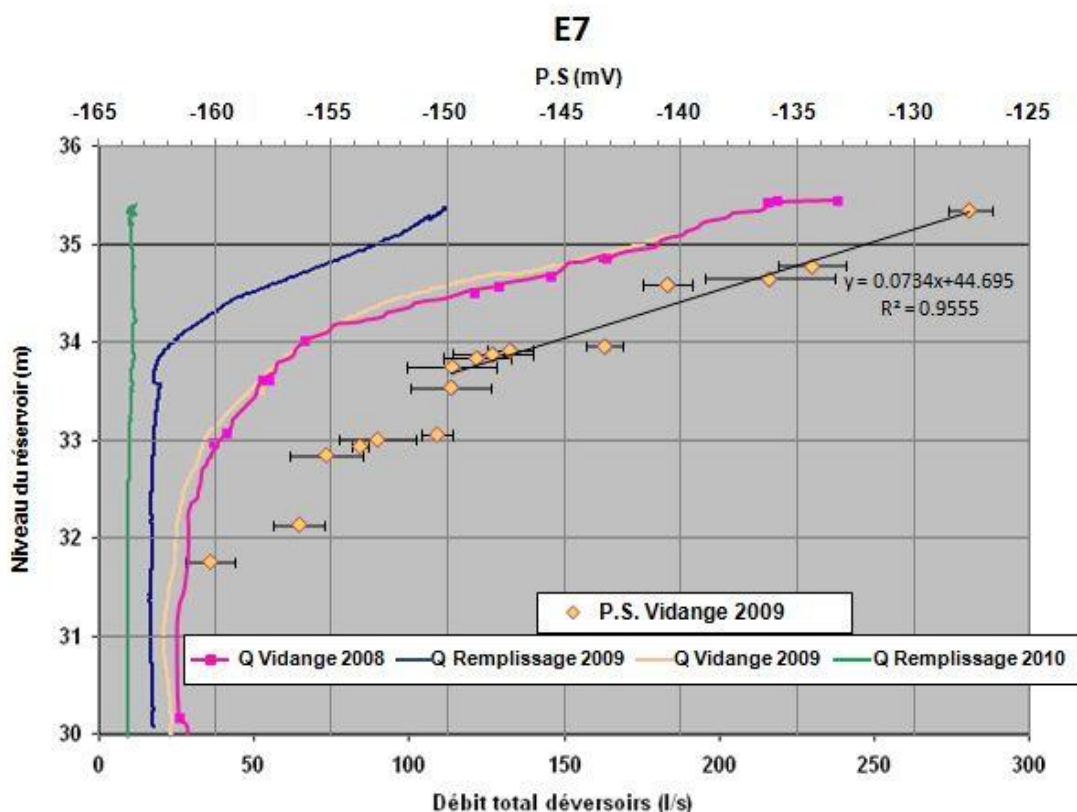
On remarque des changements sur le profil P.S. passant par les électrodes placées de part et d'autre du barrage St-Timothée. La figure 4.17 illustre ces changements avec le niveau de l'eau. Des anomalies plus négatives coïncident aux positions E8 et E15. Deux tendances semblent ressortir : dans la zone R', le potentiel semble plus stable. Il est assez variable dans la zone R avec des gradients qui changent d'un niveau à l'autre (fort entre 34.79m et 33.77m puis entre 32.86m et 31.9m, faible entre 33.77m et 32.86m).





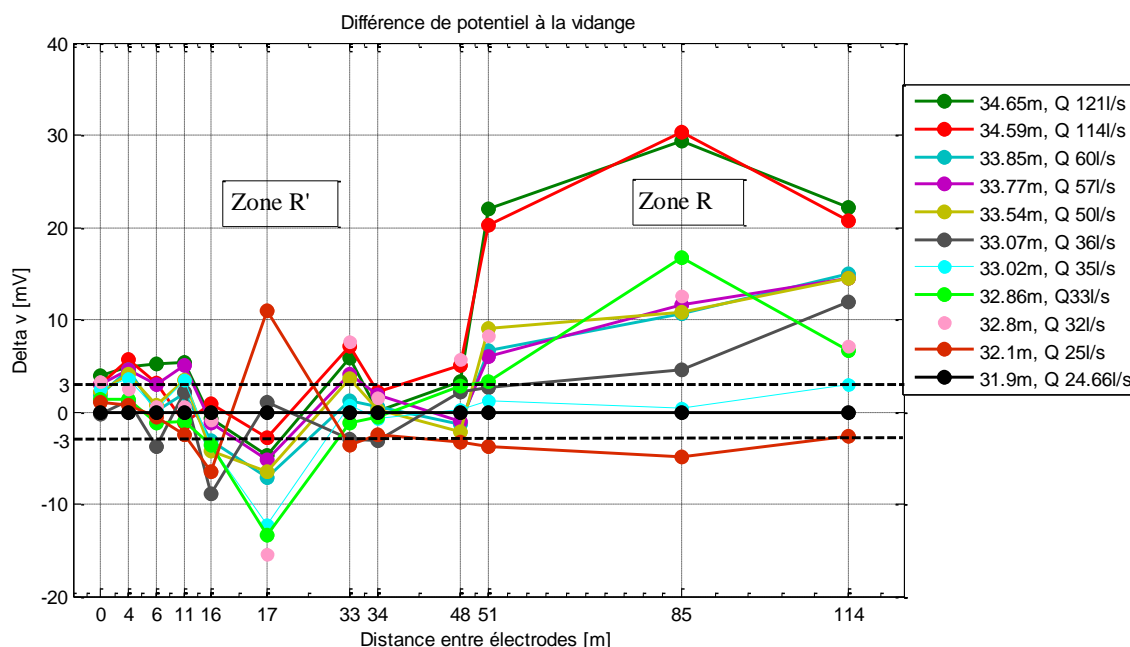
**Figure 4.17: Distribution du potentiel au profil le long du barrage pendant la vidange du réservoir (novembre 2009)**

Le potentiel enregistré en fonction du niveau de l'eau dans le réservoir aux positions des électrodes présente une tendance similaire à celle de la courbe de débit de fuite à la jonction pendant la vidange (figure 4.18). Conjointement au débit de fuite, ce potentiel décroît pour les 3 premiers mètres du niveau de l'eau de façon plus ou moins linéaire, puis, tend à être constant indépendamment du niveau de l'eau dans le réservoir. Ceci avec un débit de fuite important pour ces 3 premiers mètres et un débit de fuite minimale de 22 l/s atteint jusqu'à la vidange complète. Les données sont obtenues avec un écart-type de l'ordre de 1 à 3 mV. La figure 4.18 présente les courbes de débit total au déversoir pendant la vidange et la mise en eau du réservoir et la variation du potentiel obtenue pour l'électrode E7, localisée proche du suintement visible (cf. figure 4.12). La tendance linéaire pour les premiers mètres est représentée avec l'ordonnée à l'origine 44.695m. Le point d'inflexion entre les deux formes de la courbe de débit se localise entre 34 et 33m. Cette observation a été faite pour quelques positions de mesure le long du barrage St-Timothée et à la jonction.



**Figure 4.18:** Mesure du potentiel spontané à l'électrode E7 pendant la vidange 2009 et variation du débit total à la jonction des barrages pour les périodes allant de 2008 à 2010.

Le potentiel ainsi présenté est un potentiel global. Il est souvent désirable d'ôter les effets régionaux ou secondaires constants des profils P.S. afin de clarifier la forme des anomalies. Le débit de fuite étant pratiquement constant et faible quand le réservoir est vide, la variation du potentiel générée par le phénomène d'électro-filtration serait probablement insignifiante, voire inexistante. On pourrait ainsi considérer ce potentiel comme potentiel de référence. La différence entre ce dernier et le potentiel mesuré à chaque niveau permet d'éliminer les potentiels constants générés par d'autres sources de P.S. Le voltage résultant pourrait probablement correspondre au potentiel du à l'électro-filtration. On note que le potentiel varie d'un temps de mesure à un autre d'une différence maximale de 30 mV en valeur absolue, pour une variation de niveau total de 3m dans le réservoir St-Timothée. En comparant les valeurs du potentiel à un haut niveau par rapport à celles à un bas niveau (figure 4.19), le pic négatif qui était esquissé dans la zone R apparaît être un pic positif. Ceci correspond aux mesures faites en 2008 (cf. figures 4.7 et 4.8).



**Figure 4.19: Potentiel par rapport au niveau de référence 31.9m pour chaque charge**

Par rapport à la marge d'erreur de 1 à 3 mV qui avait été obtenue des mesures, les variations dans la zone R' y semblent être limitées. Ceci indique qu'il n'y a pas de variation de potentiel au cours de la vidange dans cette zone. Ainsi, les gradients dans la zone R pourraient corrélérer à la variation du débit total à la jonction des barrages.

Sous l'hypothèse de la linéarité entre le potentiel et la charge de l'eau dans le réservoir pendant les premiers mètres, le coefficient de couplage effectif des sols est estimé suivant l'équation simplifiée de Helmholtz-Smoluchowski (équation 3.15). Ce coefficient correspond à la pente de la droite de régression tracée entre les niveaux 33 et 36m sur la courbe représentant la variation de la polarisation spontanée en fonction du niveau d'eau. Ceci est fait pour chacune des électrodes localisées le long du barrage St-Timothée (cf. figure 4.18). Les valeurs trouvées sont comprises entre -4 et -14<sup>4</sup> mV/m.

#### b. À LA MISE EN EAU DU RÉSERVOIR

<sup>4</sup> Avec  $\zeta$  négatif dans l'équation 3.15.

La mise en eau du réservoir St-Timothée s'est effectuée à deux reprises au cours du projet. Le plan de disposition des électrodes était semblable à celui utilisé lors des vidanges. Entre temps, des injections avaient été entreprises par Hydro-Québec pour colmater la fuite à la jonction des deux barrages. Ces travaux se sont achevés le 15 Avril 2010, date à laquelle commençaient les mesures P.S. pour la mise en eau. Dû à des modifications de l'accessibilité sur le site, les électrodes ont donc été déplacées de peu (2 à 3m). Le débit total de fuite enregistré avait considérablement réduit (~10 et 9.5l/s) et était constant avec le niveau de l'eau. Le potentiel total mesuré est croissant avec le niveau de l'eau et sa distribution pour chacune des électrodes a une allure différente. La figure 4.20 montre le cas de distribution du potentiel pour l'électrode E7. Le potentiel semble être concentré autour d'une valeur.

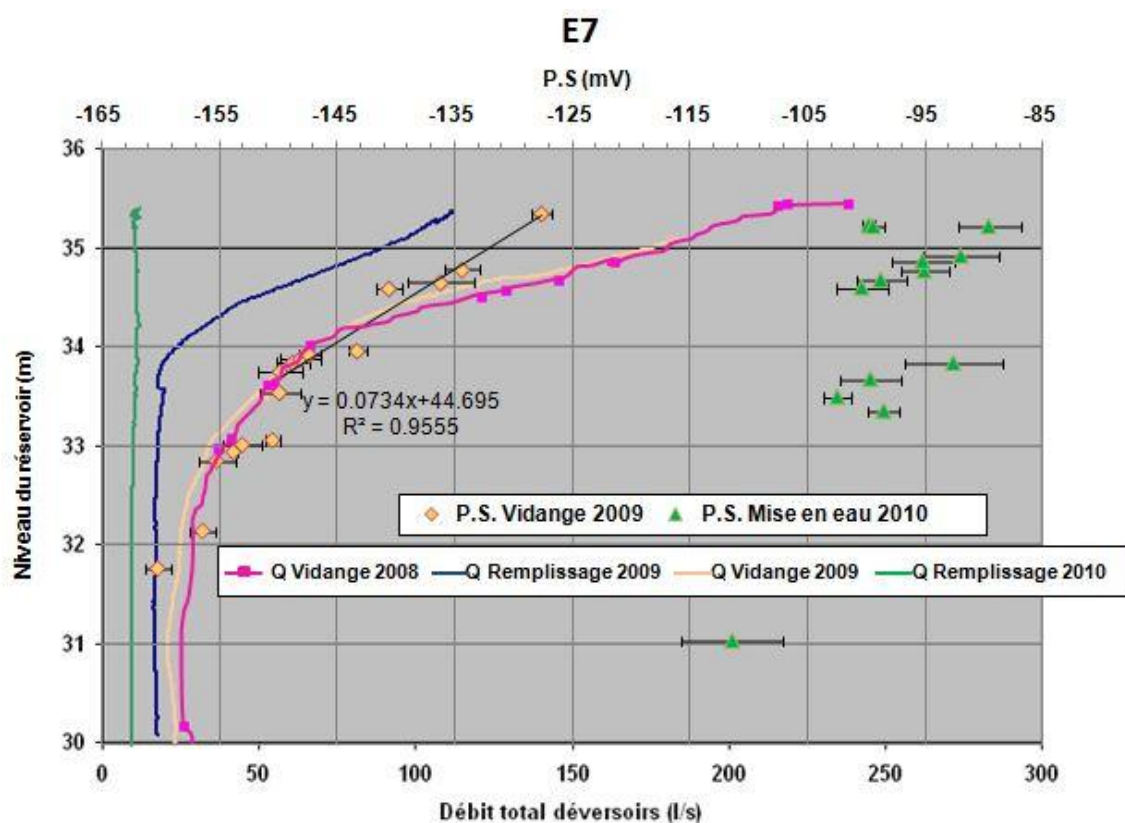


Figure 4.20: Mesure du potentiel spontané à l'électrode E7 pendant la vidange 2009 et le remplissage 2010, variation du débit total à la jonction des barrages.

Pour l'ensemble des mesures, la gamme des valeurs de potentiel s'étale entre -160mV et -20mV. Le profil le long du barrage, à la figure 4.21, illustre une anomalie à la position E8 (dans la zone R) et de faibles autres aux positions E6 et E15 (dans la zone R', cf. figure 4.15).

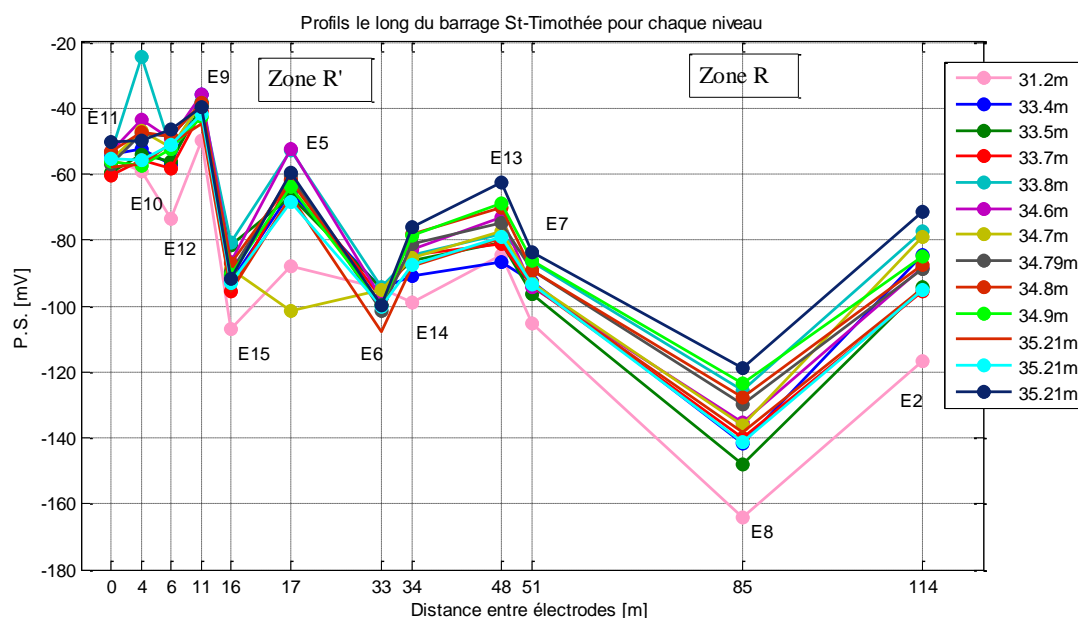


Figure 4.21: Distribution du potentiel au profil le long du barrage pendant la mise en eau du réservoir (avril 2010).

Comparé au potentiel observé au niveau le plus bas atteint pendant les mesures (33.4m), le potentiel illustre un pic positif dans la zone R (figure 4.22). De façon globale, le potentiel tend à être stable.

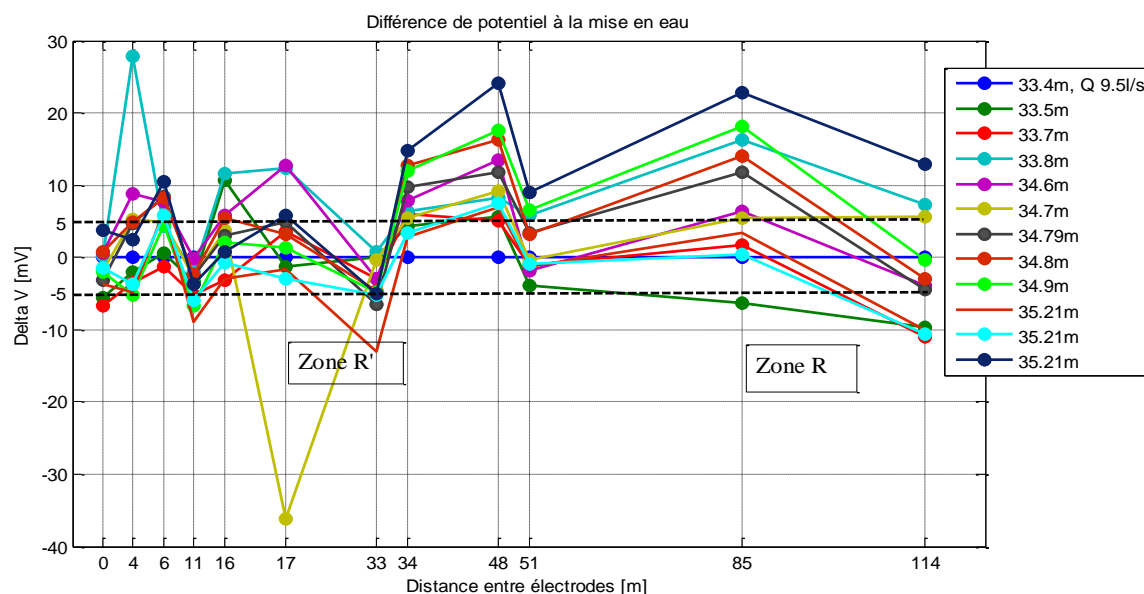


Figure 4.22: Potentiel par rapport au niveau de référence 33.4m pour chaque charge.

#### 4.6 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA RÉPONSE P.S.

Pour apporter des réponses supplémentaires aux données de terrain, on a recours à la modélisation numérique. Le calcul numérique s'est effectué avec le logiciel Comsol Multiphysics. Ce logiciel possède plusieurs programmes numériques qui concourent à résoudre des problèmes physiques formulés comme la solution d'une équation aux différentielles partielles. Ces derniers pouvant être couplés à diverses disciplines (tel est le cas du phénomène d'électro-filtration considéré: "variation électrique engendrée par une variation du gradient hydraulique"). Le modèle numérique est donc adapté à la géométrie de la jonction des deux barrages et aux propriétés physiques obtenues par l'acquisition des mesures. On a ainsi obtenu la variation du potentiel spontané du à l'électro-filtration en fonction du changement progressif du niveau de l'eau dans le réservoir St-Timothée.

N'ayant pas assez d'informations afin de caractériser totalement le site, le modèle de base, communément appelé modèle initial, est construit suivant les connaissances du site (le niveau de l'eau dans les réservoirs, la présence du batardeau comme zone d'étanchéité, la position des noyaux et le débit de fuite) et en considérant les valeurs de conductivités électriques apparentes obtenues par les mesures de terrain. Le modèle 3D solutionne le problème de l'écoulement en milieu non-saturé et saturé. Le couplage de l'électro-filtration est effectué par l'application de la loi de Darcy et du module AC/DC de Comsol Multiphysics sous une source DC. Ceci met en évidence le système d'équations:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \left[ \frac{K}{\rho_f g} \nabla (p + \rho_f g Z) \right] = 0 \\ -\nabla \cdot (\sigma \nabla V - Q_v u) = 0 \end{cases}$$

où  $K$  désigne la conductivité hydraulique [m/s],  $\rho_f$  la masse volumique de l'eau [kg/m<sup>3</sup>],  $g$  la densité [m/s<sup>2</sup>],  $p$  la pression [Pa],  $Z$  l'élévation [m],  $\sigma$  la conductivité électrique [S/m],  $V$  le potentiel [V],  $Q_v$  l'excès de charge électrique [C/m<sup>3</sup>], et  $u$  la vitesse de l'écoulement [m/s]. Les conditions aux frontières dans le modèle sont assurées par les conditions de Neumann (1) et de Dirichlet (2):

- Pour le cas de la réponse hydraulique,

$$\begin{cases} p = \rho_f g (H_o - Z) \\ n \left[ \frac{K}{\rho_f g} \nabla \cdot (p + \rho_f g Z) \right] = 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{dans les réservoirs et aux frontières eau-sol (2)} \\ \text{partout ailleurs (1)} \end{array}$$

- Pour le cas de la réponse électrique,

$$\begin{cases} n.J = 0 \\ V = 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{isolation électrique à la surface} \\ \text{partout ailleurs} \end{array}$$

La figure 4.23 illustre les vues en plan du modèle considéré. La conductivité hydraulique des sols est tiré de (Domenico et Schwartz, 1998); assimilant les noyaux à de l'argile et l'enrochement au sable. L'estimation de la conductivité hydraulique est basée sur l'interprétation de la direction de l'écoulement qui avait été faite:

- Direction1 : au-dessus du niveau de la cage de bois, l'eau circule de l'amont du barrage St-Timothée vers l'aval en passant par la zone excavée du batardeau ("crib de bois") (figure 4.23 a) via un chemin privilégié dont la côte supérieure est au-dessus du batardeau.

Cette première hypothèse est liée à la présence des matériaux de perméabilité élevée qui seraient situés au-dessus de la cote du batardeau et qui favoriseraient le passage de l'eau.

- Direction2 : en-dessous, l'écoulement se ferait de l'amont du barrage A vers le barrage St-Timothée (figure 4.23 b).

Cette deuxième supposition est liée à la présence du suintement visible au déversoir St-Timothée lorsque ce dernier est vide, et ceci en dépit du faible débit de fuite mesuré.

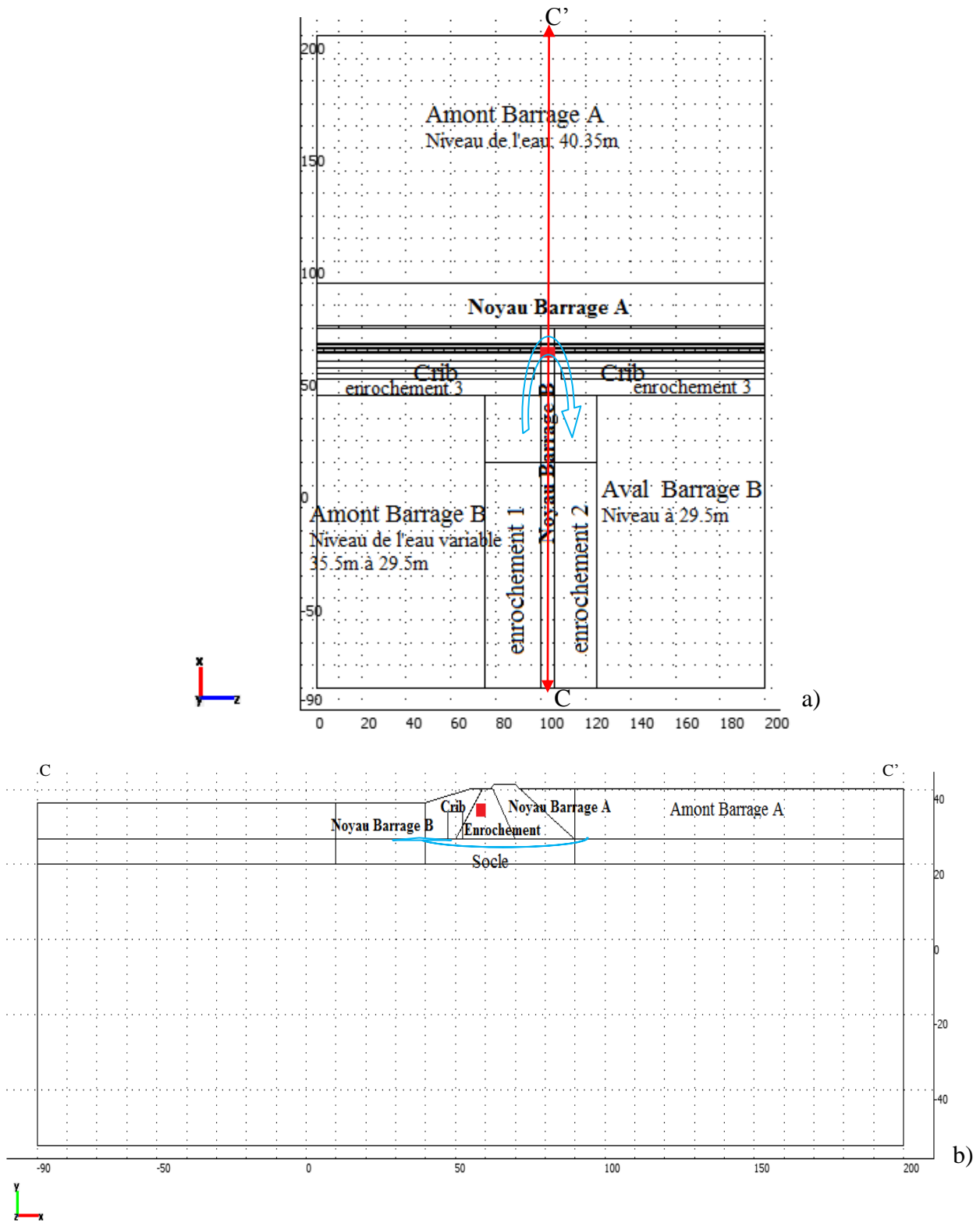


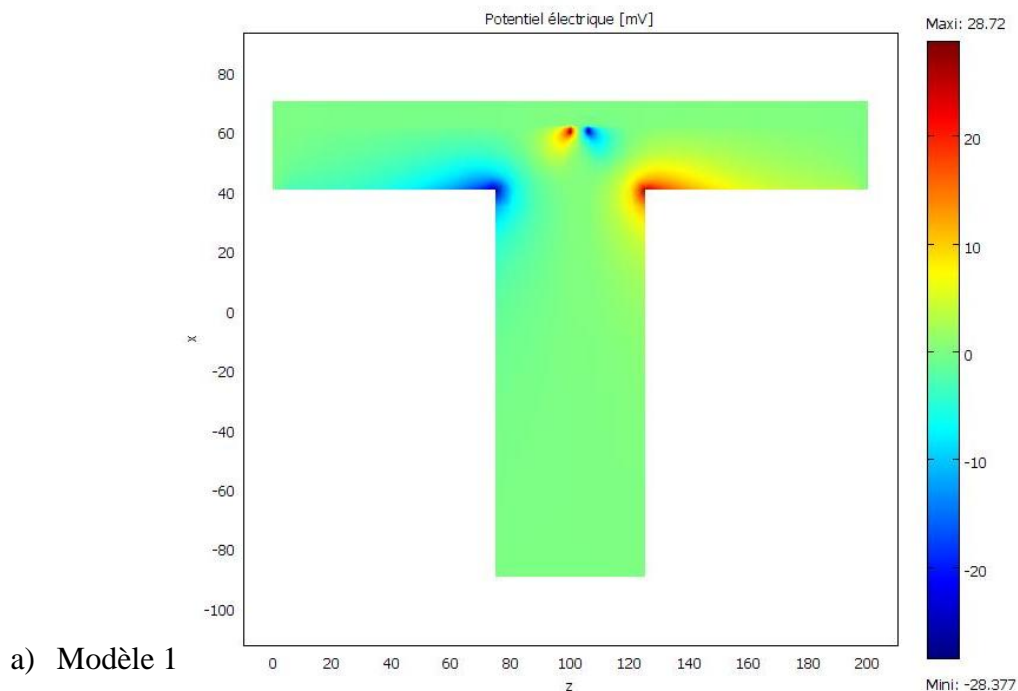
Figure 4.23: Géométrie du modèle adoptée avec direction d'écoulement en bleu; a) Plan xz, b) Plan yx

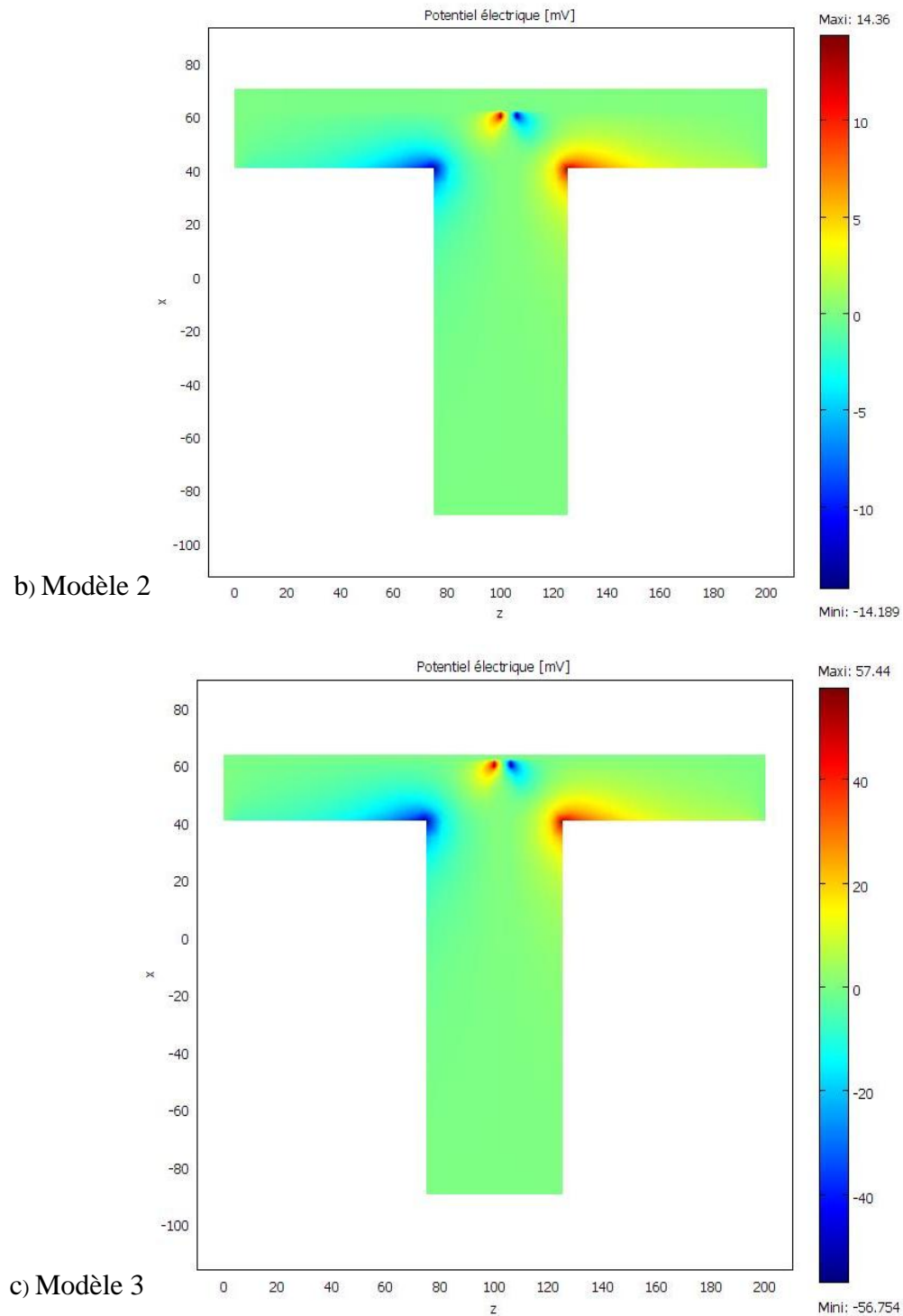


La méthode de Darcy est choisie sur la base de la relation linéaire entre le débit de fuite et la charge de l'eau pour les premiers mètres du niveau d'eau (35.5m-33.5m) (cf. figures 4.9 et 4.18). Pour ces mêmes niveaux d'eau, un estimé du coefficient de couplage effectif sur le barrage de l'ordre de -4 à -14 mV/m a été déduit de l'équation de Helmholtz-Smoluchowski (équation 3.15) et de la variation du potentiel électrique en chacune des positions de mesures sur le terrain.

Afin d'ajuster le modèle aux données, la sensibilité de la réponse P.S. aux paramètres physiques doit être prise en compte (cf. chapitre 2). La variation de la conductivité hydraulique influence particulièrement la direction de l'écoulement, alors que celle de la conductivité électrique et du coefficient de couplage joue sur la réponse P.S. En faisant varier les propriétés des différents sols, on remarque ainsi que cette sensibilité est plus importante avec une variation du coefficient de couplage qu'avec celle de la conductivité électrique.

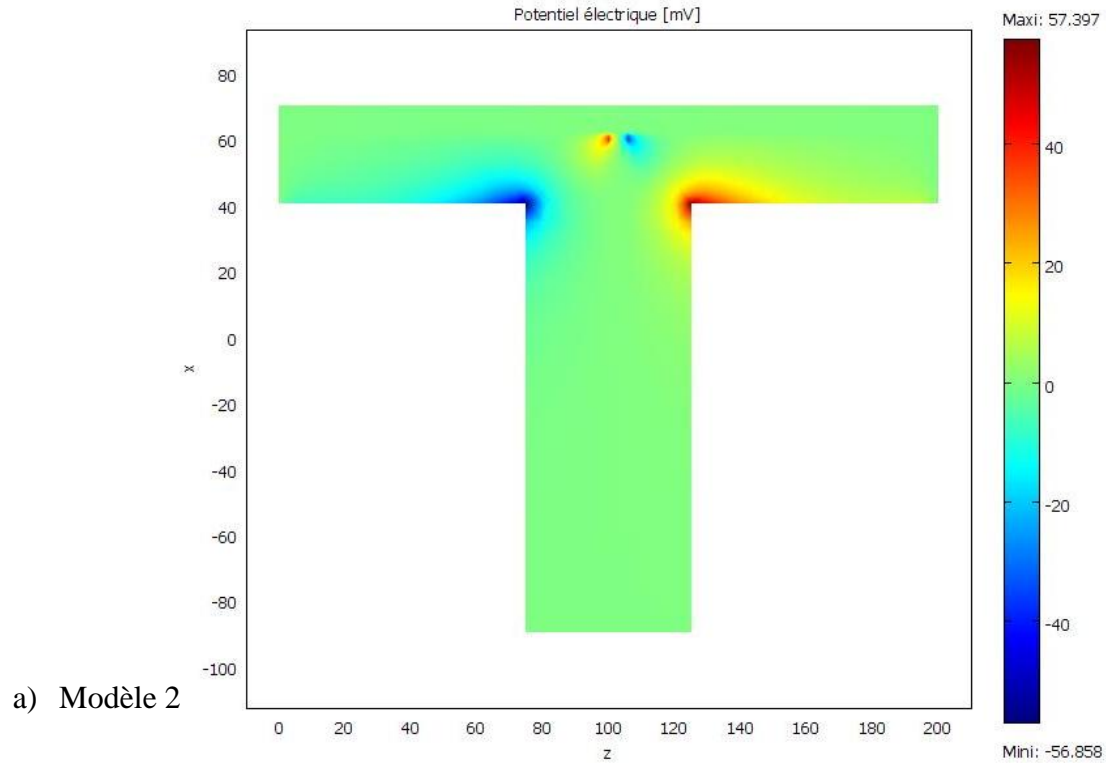
Pour un rapport de proportionnalité  $\alpha$  entre les coefficients de couplage de tous les sols du modèle, le potentiel augmente ou diminue tout en gardant le même rapport de proportionnalité  $\alpha$ . La figure 4.24 montre le résultat obtenu pour un rapport  $\alpha$  égal à 2 entre les coefficients de couplage des sols du modèle.

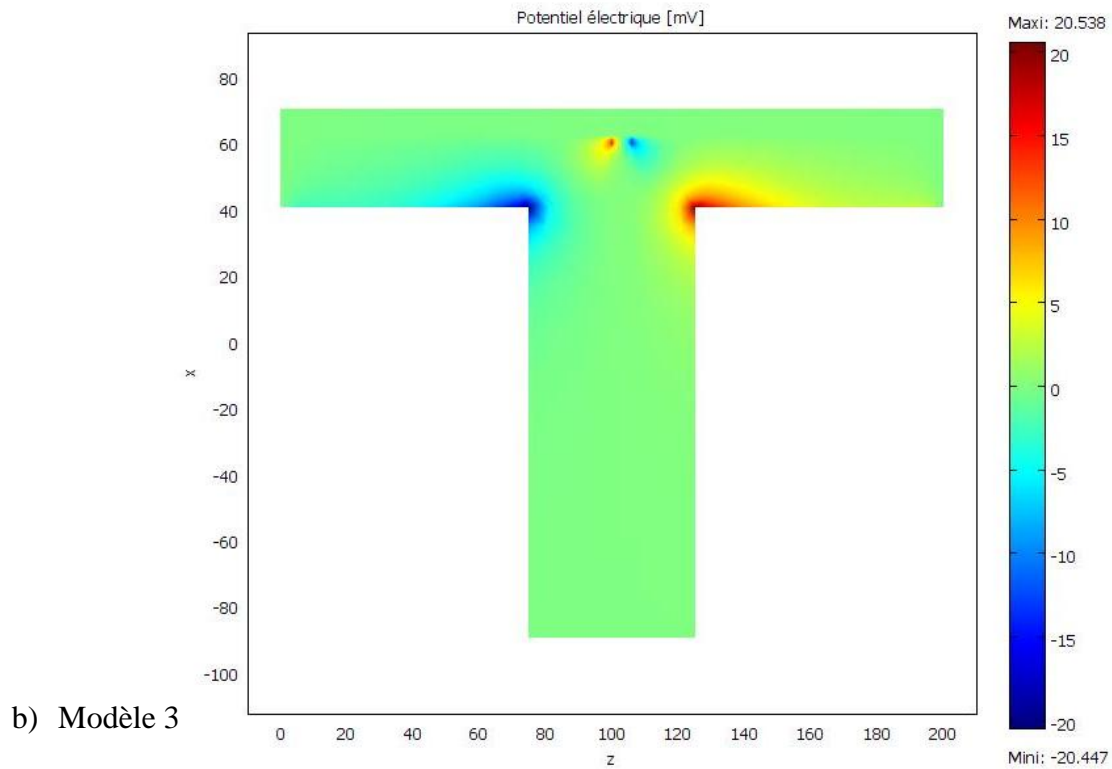




**Figure 4.24: Sensibilité du potentiel à la variation du coefficient de couplage de tous les sols du modèle. Le rapport du coefficient  $\alpha$  est de 2 entre le modèle 1 et le modèle 2 et de 2 entre le modèle 3 et le modèle 1 (coefficient<sub>modèle 3</sub> > coefficient<sub>modèle 1</sub> > coefficient<sub>modèle 2</sub>).**

Pour un même rapport de 2 entre les conductivités électriques, la différence entre les potentiels calculés est illustrée à la figure 4.25. Le potentiel diminue avec une augmentation de la conductivité électrique. Cette augmentation n'est pas fonction du rapport. Des résultats similaires ont été obtenus en variant les propriétés physiques pour le choix de sol particulier (l'enrochement pour ce cas).





**Figure 4.25: Sensibilité du potentiel à la conductivité électrique de tous les sols du modèle. Le rapport de conductivité électrique est de 2 entre le modèle 1 et le modèle 2, et de 2 entre le modèle 3 et le modèle 1 ( $\sigma_{\text{modèle 3}} > \sigma_{\text{modèle 1}} > \sigma_{\text{modèle 2}}$ ). Le modèle 1 correspond à la figure 4.24 a.**

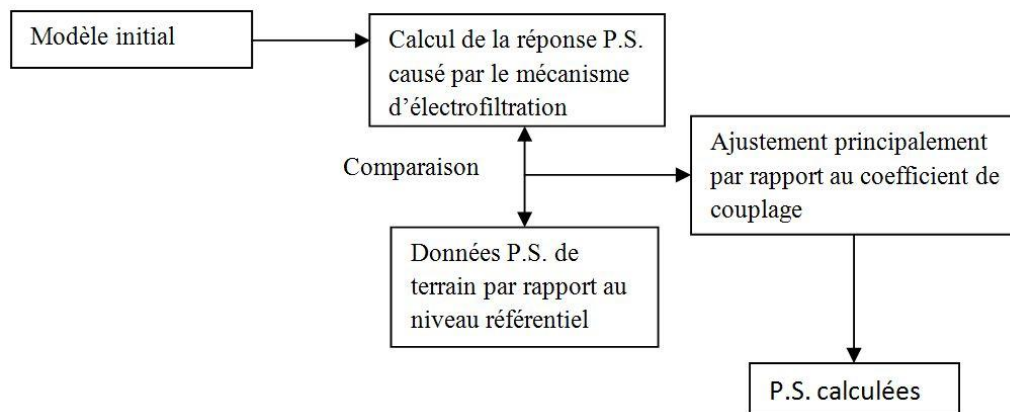
Avec un choix de coefficient couplage dans la gamme obtenue des mesures, les résultats précédents ont permis de redéfinir ces paramètres. Le tableau 4.3 synthétise les paramètres physiques utilisés dans le modèle.

Tableau 4.3: Propriétés physiques des sols du modèle

	Conductivité hydraulique, K [m/s]	Conductivité électrique, $\sigma$ [S/m]	Coefficient de couplage, $C_{12}$ [(S/m)*(V/Pa)]	Excès de charge, $-Q_v \approx$ $\rho \cdot g \cdot C_{12} / K$ [C/m <sup>3</sup> ]
<b>Eau<sup>5</sup></b>	1	1.94e-2	0	0
<b>Noyau barrage St-Timothée</b>	1e-9	1e-2	-1.5e-13	1.4715
<b>Noyau barrage Les Cèdres</b>	1e-9	1e-1	-1.5e-13	1.4175
<b>Batardeau ("Crib")</b>	1e-20	1e-4	0	0
<b>Enrochement</b>	1.5e-5	1e-3	-1.5e-8	9.81
<b>Enrochement 1</b>	1.75e-5			8.408
<b>Enrochement 2</b>	2e-5			8.408
<b>Enrochement 3</b>	1e-5			14.715
<b>Socle</b>	1e-10	1.5e-4	0	0
rho = 1000 [kg/m <sup>3</sup> ] g = 9.81 [m/s <sup>2</sup> ] * <u>Conversion</u> : V/m=(9810) V/Pa				

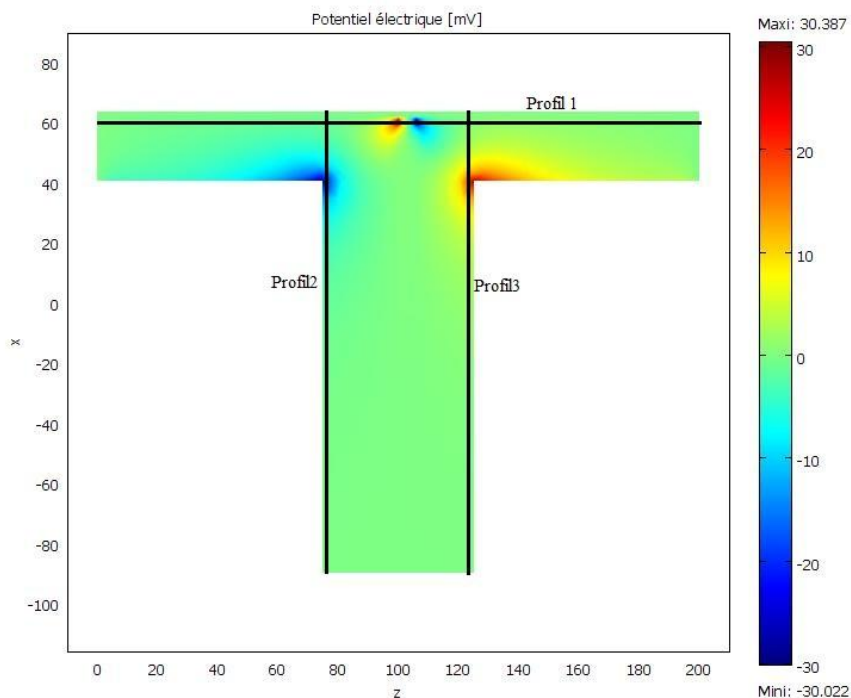
Le calcul du modèle proposé s'est donc effectué suivant les étapes présentées à la figure 4.26.

<sup>5</sup> La conductivité électrique de l'eau dans le réservoir a été mesurée sur le terrain avec le conductimètre YSI Pro20 Lab de YSI.



**Figure 4.26: Étapes pour l'ajustement du modèle**

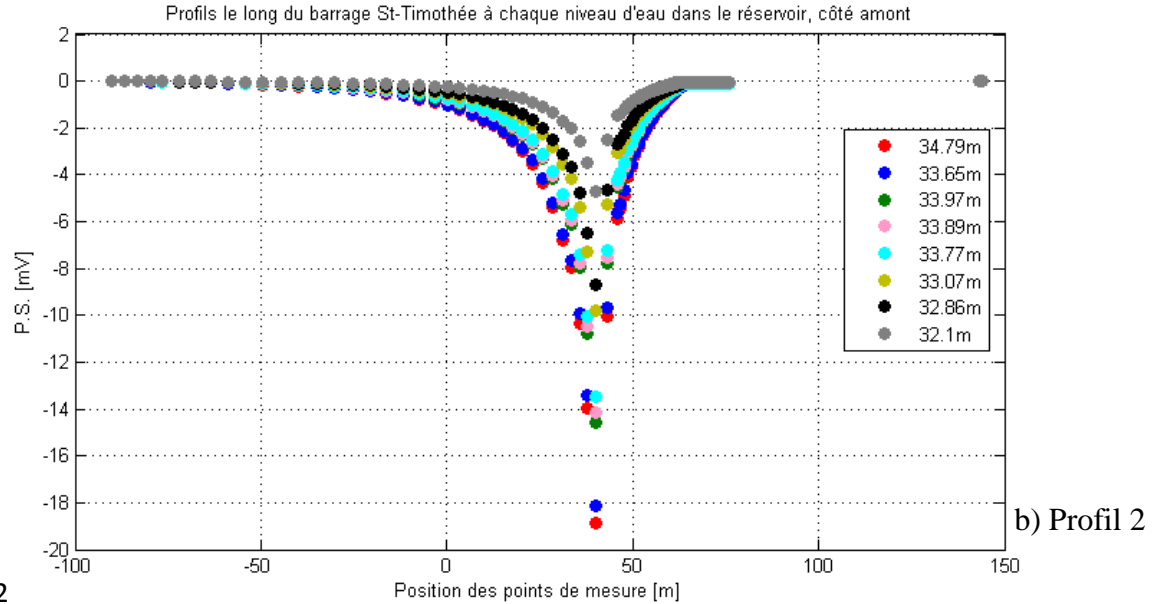
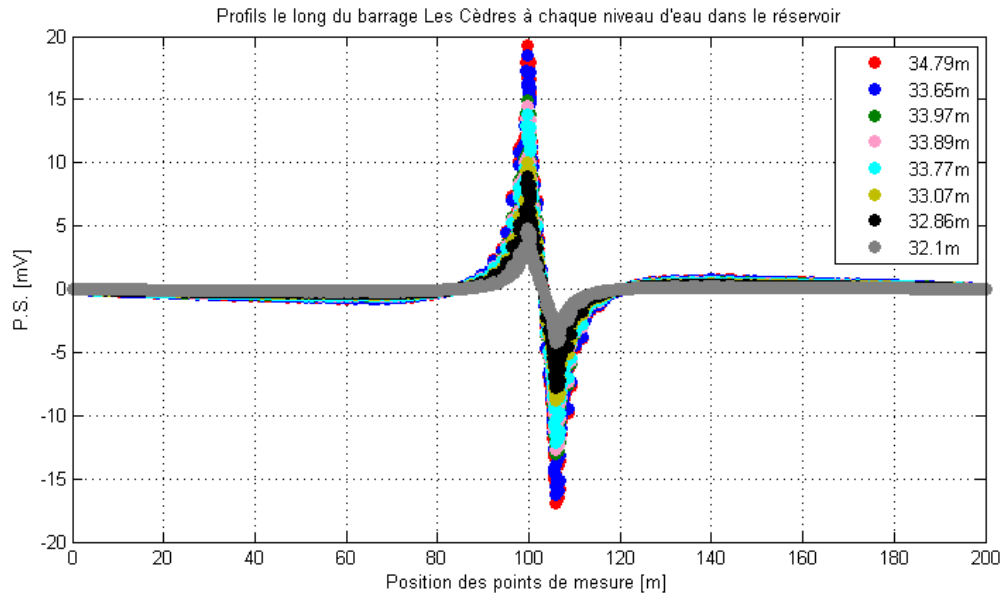
Afin de comparer les données calculées aux données de terrain, l'échantillonnage des mesures sur le modèle a été effectué aux positions correspondant aux points de mesure lors des levés géophysiques. Le potentiel a été référencié par rapport à un même niveau (potentiel à la charge 31.2m). La figure 4.27 présente une distribution du potentiel obtenue pour la charge 34.79m et trois profils de données extraits.

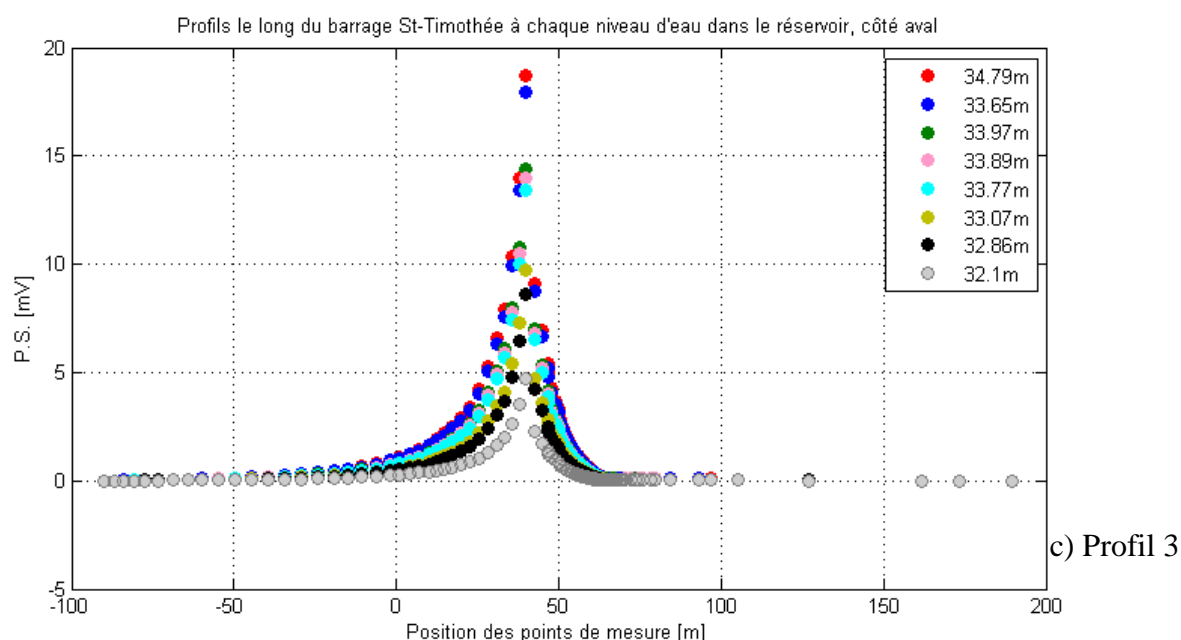


**Figure 4.27: Distribution du potentiel calculée à la surface pour la charge 34.79m.**

Sur la figure 4.28, la variation du potentiel avec le niveau de l'eau pour chacun de ces trois profils est représentée. Le gradient du potentiel entre une entrée (potentiel négatif) et une sortie

(potentiel positif) diminue avec le niveau de l'eau dans le réservoir. On constate cependant que les anomalies dues à un mécanisme d'électro-filtration ne corrèlent pas avec les données mesurées.





**Figure 4.28: Profils extraits à partir des anomalies P.S. calculées.**

## **4.7 ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS**

### **4.7.1 À PROPOS DES MESURES DE POLARISATION SPONTANÉE**

Les courbes de variation du débit de fuite en fonction de la charge de l'eau dans le réservoir pour les deux dernières opérations de vidange (2008 et 2009) reflètent une affinité entre les mesures; cette similitude est aussi visible sur les données de P.S. réalisées pendant l'une des opérations de vidange du réservoir St-Timothée (figure 4.18). Par ailleurs, l'observation des données réalisées pendant la mise en eau du réservoir (au cours du mois d'avril 2010) ne corrèle pas avec les précédentes mesures. La distribution du potentiel avec la variation de la charge qui en résulte est différente (figure 4.20). Ces changements sont vraisemblablement attribuables aux opérations d'injection qui avaient été réalisées à la jonction des barrages, le débit total de fuite ayant considérablement diminué ( $\sim 10$  l/s). Ces opérations contribuent dans un sens à un changement des propriétés physiques du sol.

On a noté que le potentiel total était très variable d'une position à une autre, dans le temps (cf. paragraphe 4.5.2) et dans l'espace (figure 4.3). D'une part, le potentiel varie dans le même sens que le débit total de fuite d'eau et en sens inverse du gradient de la charge dans le réservoir. Pour la vidange du réservoir par exemple, les résultats indiquent que plus le gradient hydraulique



devient grand, plus le potentiel devient négatif (figure 4.18). C'est une observation qui est différente des résultats que l'on retrouve dans la littérature (Haines, 1978; Telford *et al.*, 1990) et des attentes de la modélisation numérique (figure 4.28): la valeur absolue du potentiel diminue avec l'augmentation du gradient hydraulique.

D'autre part, deux zones d'anomalie, R et R', sont mises en évidence pendant la vidange (figure 4.17). On remarque aussi les changements qu'il y a eu à ces endroits au cours des périodes. La stabilité du potentiel avec la variation du niveau de l'eau dans la zone R' indique une faible corrélation avec un phénomène d'électro-filtration (figure 4.19). Par ailleurs, les variations dans la zone R subsistent à la fin de la vidange et au début de la mise en eau (cf. figures 4.19 et 4.22). Cette zone pourrait être reliée à une zone de provenance du faible débit de fuite mesuré. Et les variations observées pourraient être liées à une influence du mécanisme d'électro-filtration. Cette zone est en corrélation avec la zone entourant le suintement visible à la vidange complète du réservoir (cf. figure 4.11) malgré le grand écart entre les points de mesure. On remarque aussi un changement de polarité dans cette zone (figures 4.17 et 4.19). Le pic positif retrouvé dans la zone R (figure 4.19) ferait donc référence à une sortie d'eau plutôt qu'à une entrée telle que le stipulent les interprétations qui ont été faites sur le site. Ceci laisse préconiser un écoulement du barrage Les Cèdres vers l'amont du barrage St-Timothée. L'une des hypothèses probables serait la présence d'un réseau d'entrée et de sortie d'eau. Dans ce cas, l'anomalie positive serait-elle donc prédominante et masquerait-elle les anomalies négatives? Ceci justifierait-il la variation "inverse" du gradient de potentiel avec le gradient de charge?

Quelques explications plausibles peuvent être reliées à ces différences:

- l'erreur sur la prise des mesures: changement de polarité,
- le signe du coefficient de couplage effectif du sol qui serait probablement positif
- la position de l'électrode de référence (figure 4.11).

L'apport de solutions à ces hypothèses permettrait-il de faire une correspondance entre la réponse P.S. observée et le mécanisme d'électro-filtration recherché?

Afin d'apporter des éléments de réponses à ces différentes hypothèses, certains points sont abordés, notamment le changement de polarité du coefficient de couplage et la position de la référence pour la prise des mesures.

### Signe du coefficient de couplage

Les anomalies négatives de polarisation spontanée sont généralement associées à des zones de recharge du fluide et les anomalies positives aux zones de décharge du fluide. Cette interprétation se déduit particulièrement sous les considérations suivant lesquelles le signe du coefficient de couplage électrocinétique serait l'opposé du signe du potentiel zéta (Gloaguen, 2000; Révil et Pezard, 1999; Révil *et al.*, 1999). De la littérature, on en tire que le potentiel zéta a des comportements particuliers d'un sol à un autre (Gloaguen, 2000; Révil et Pezard, 1999; Révil *et al.*, 1999) et que ce comportement dépend de la température dans le sol, de la salinité et du pH.

Nos connaissances du barrage St-Timothée ont révélé que ce dernier possédait un noyau central avec un certain contenu en till et en argile. Pour le cas d'un sol composé de silicate soumis à une température comprise entre 20 et 25°C et dans lequel circule une solution salée, certains auteurs (Atesok *et al.*, 1988; Lorenz, 1969) présentent qu'en dessous du seuil du pH (pzc)<sup>6</sup>, le potentiel tend à être positif. Des essais en laboratoire pour le type de sol en place sur le site des barrages Les Cèdres et St-Timothée permettraient donc d'évaluer cette possibilité.

### Position de l'électrode de référence

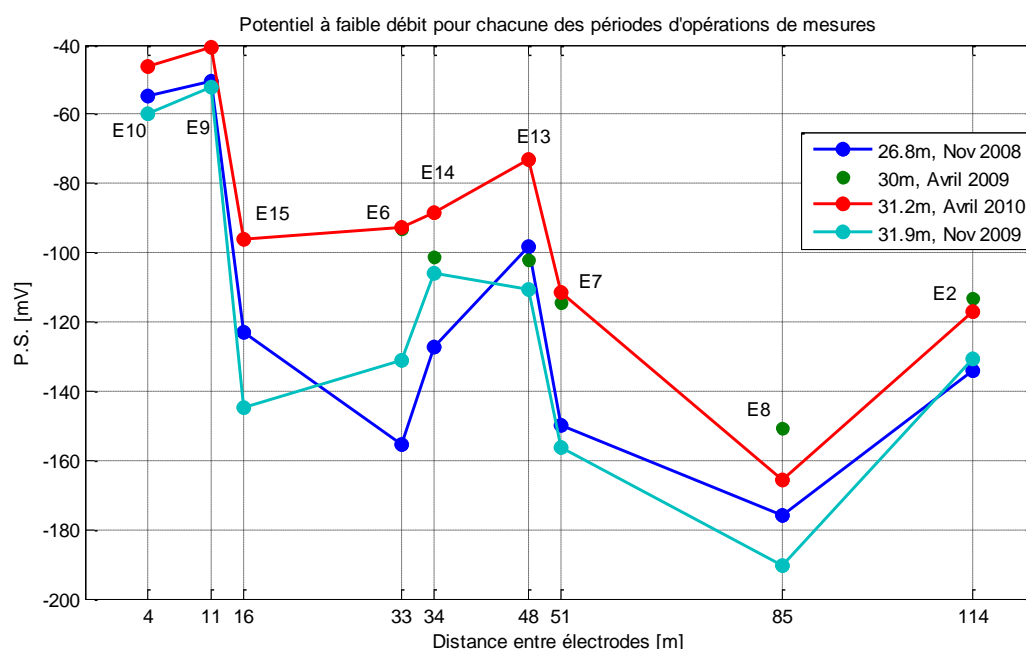
Cette électrode est située en amont du barrage St-Timothée pour lequel le niveau de l'eau dans le réservoir change. Le niveau du réservoir Les Cèdres étant le même tout le long des campagnes de mesures, cette électrode pourrait donc subir l'influence due aux variations de pression entre les deux réservoirs Les Cèdres et St-Timothée.

Une particularité des données est que le potentiel initial (régional) du site n'est pas connu. Ceci cause une difficulté pour les interprétations vue qu'à chaque niveau d'eau pour lequel le débit semble constant, le potentiel varie temporellement. La question se pose donc sur le choix d'un potentiel de référence. L'utilisation des valeurs de potentiel à débit constant pendant la vidange ou la mise en eau comme niveau de référence pour l'ensemble des campagnes de mesure serait-elle un choix à considérer?

---

<sup>6</sup> Note : pH (pzc) est défini comme le pH pour lequel il n'ya aucune charge de surface (le potentiel zéta est nul).

En comparant ces potentiels (figure 4.29), on remarque que les tendances sont similaires à quelques variations près. La source de ces variations n'est pas très bien cernée. Elles pourraient être reliées aux erreurs de mesure, aux variations de température dans le sol (telles que montrées par les mesures de thermométrie, cf. figure 4.10), ou à d'autres mécanismes comme présenté au chapitre 3. Le choix du potentiel de référence pour chacune des périodes de mesures semble ainsi justifié.



**Figure 4.29: Comparaison des potentiels obtenus à débit faible pour chacune des opérations.**

L'inverse de polarité de la réponse de polarisation est ainsi un résultat qui pourrait faire l'objet de discussion pour les travaux dans les barrages. Cependant, les observations sur l'inverse de polarité rejoignent les résultats des travaux effectués par Bolève (Bolève, 2010). Dans le cadre de son expérience, l'anomalie négative remarquée en aval du barrage, annonce la rupture de la structure pour lequel la principale cause de l'érosion est la faiblesse du contact entre les matériaux de construction. Pour d'autres travaux de Bolève, qui n'ont pas fait l'objet de publication, les conclusions plausibles mettent l'accent sur l'influence dominante du phénomène de diffusion sur le phénomène d'électro-filtration. Dans cette expérience, il présente la variation du potentiel dans un sol composé de sable dans lequel un écoulement préférentiel, de l'amont vers l'aval, est réalisé avec du gravier. Pour cette manipulation, il a utilisé deux types d'électrolyte, une eau déminéralisée et une eau saumure. L'injection de l'eau déminéralisée dans

le système crée la présence un potentiel distribué positivement et négativement de l'amont vers l'aval. Par la suite, l'injection de l'eau saumure fait changer la polarité du potentiel. Cette polarité reste conservée après une seconde injection de l'eau déminéralisée.

#### **4.7.2 À PROPOS DES MESURES DE TOMOGRAPHIE ÉLECTRIQUE**

Pendant la montée ou la descente du niveau de l'eau dans le réservoir, le sol subit une suite d'état de saturation-désaturation ou inversement. Pendant la mise en eau, le sol a un degré de saturation plus faible et tend à se saturer au fur et à mesure que le niveau augmente. Pendant la vidange, la désaturation du sol n'est probablement pas complète et immédiate avec la diminution du niveau. Tel que ressorti dans la revue de littérature, ce phénomène génère aussi une réponse P.S. Cette saturation ou désaturation progressive est donc un mécanisme de génération d'effet P.S. avec délai par rapport aux charges hydrauliques qui pourrait influencer la réponse de polarisation spontanée.

La montée et la descente de l'eau dans le réservoir pourraient aussi engendrer des variations latérales notamment sur les profils ERT. Une modélisation directe en 3D a été effectuée avec le logiciel Res3DMod de Geotomo Software; ceci afin de mettre en évidence l'influence que pourrait avoir les effets latéraux sur les profils de tomographie électrique 2D sur lesquels les mesures ont été acquises avec la variation du niveau de l'eau dans le réservoir. La procédure utilisée est récapitulée sur la figure 4.30. En effet, la réponse du modèle est calculée via le logiciel Res3DMod pour une configuration dipôle-dipôle. Ensuite, la réponse calculée est inversée avec Res3DInv. Le code de programmation de Bernard Giroux (annexe 3) écrit sous le langage Perl permet d'extraire les données inversées avec Res3DInv correspondant au profil considéré et de générer le fichier de données Res2DInv pour ce profil. Ces fichiers obtenus en format ".dat" peuvent être réutilisés en entrée avec Res2DInv afin d'obtenir le modèle inverse pouvant correspondre à l'image du sol sous le profil en 2D.

Le modèle utilisé est illustré sur la figure 4.31. Ce modèle de profondeur 12m met en relief l'air, l'eau, le sol et un profil parallèle au bas du talus et distant de 5m. Les électrodes de mesure sont espacées de 2m et de 10m respectivement suivant les axes (x,y). Les paramètres de résistivité

électrique sont regroupés dans le tableau 4.3. Les paramètres de résistivité de l'eau et du sol sont dans le même intervalle des valeurs que les résistivités apparentes obtenues sur le site.

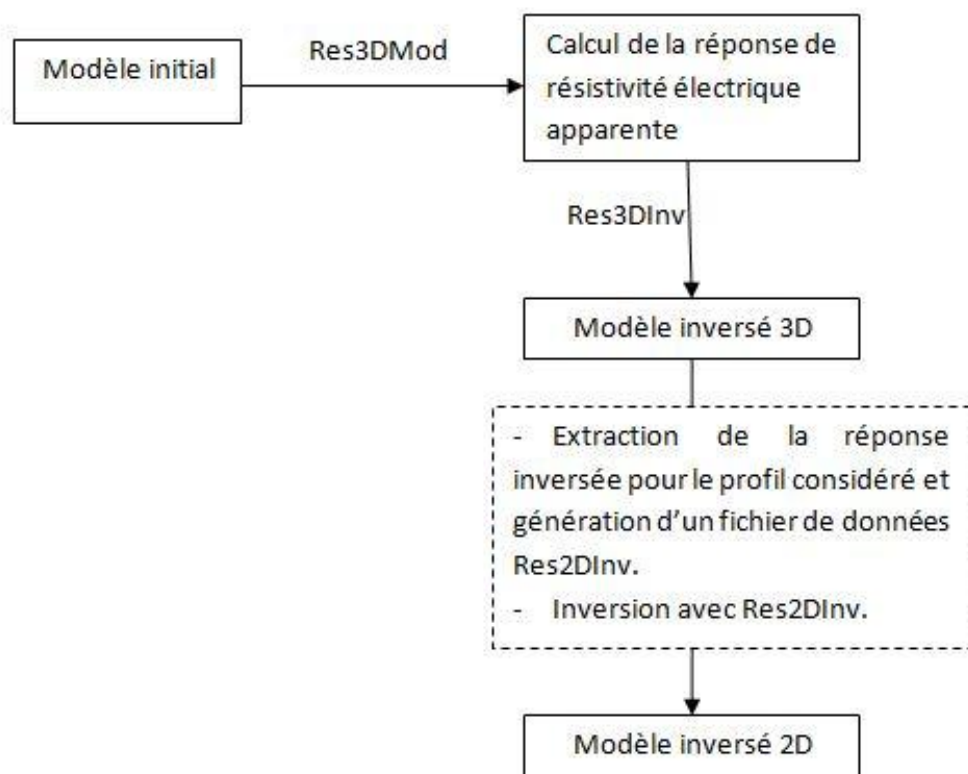


Figure 4.30: Récapitulatif de la procédure d'inversion pour la mise en évidence des variations latérales.

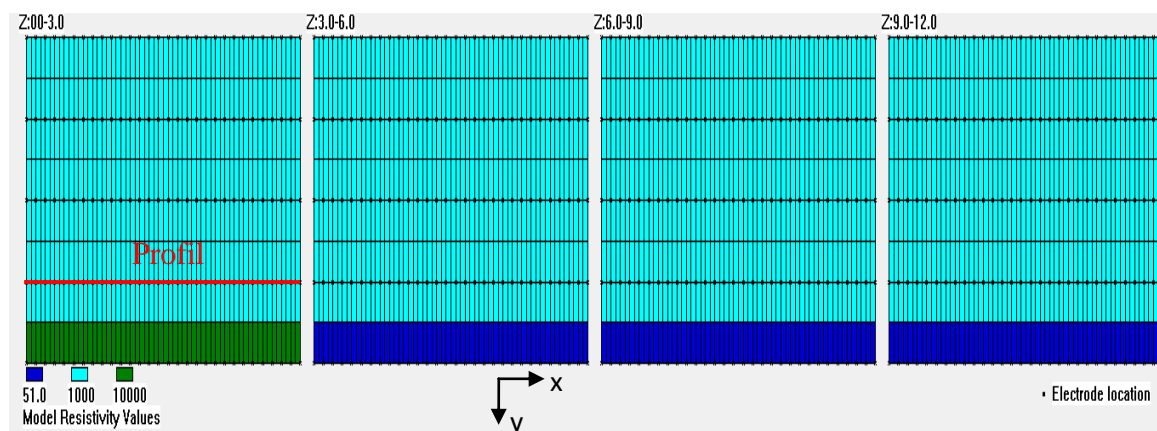


Figure 4.31: Modèle de résistivité pour quantifier l'influence des variations latérales sur l'inversion 2D. Le plan est représenté sur une profondeur de 12m. La hauteur totale d'eau est de 9m.

Tableau 4.4: Paramètres du modèle de résistivité

	Résistivité électrique ( $\Omega.m$ )
Air	10000
Eau	51
sol	1000

Les figures 4.32 et 4.33 illustrent les pseudo-sections obtenues pour le niveau d'eau égal à 3m, puis égal à 6m. Le profil semble être influencé. Cette influence se manifeste par la présence de couches moins résistantes au-dessous du niveau de l'eau. Cette résistivité croît avec la diminution de la hauteur d'eau.

Pour affiner ce résultat, le suivi temporel entre les deux niveaux de variation de l'eau est réalisé avec un intervalle de temps de 4 jours. Ceci correspond à la durée des prises de mesures et au gradient de charge de 3m réalisé sur le site dans le réservoir B. On constate que l'augmentation de la résistivité est essentiellement limitée entre les deux variations du niveau de l'eau (figure 4.34).

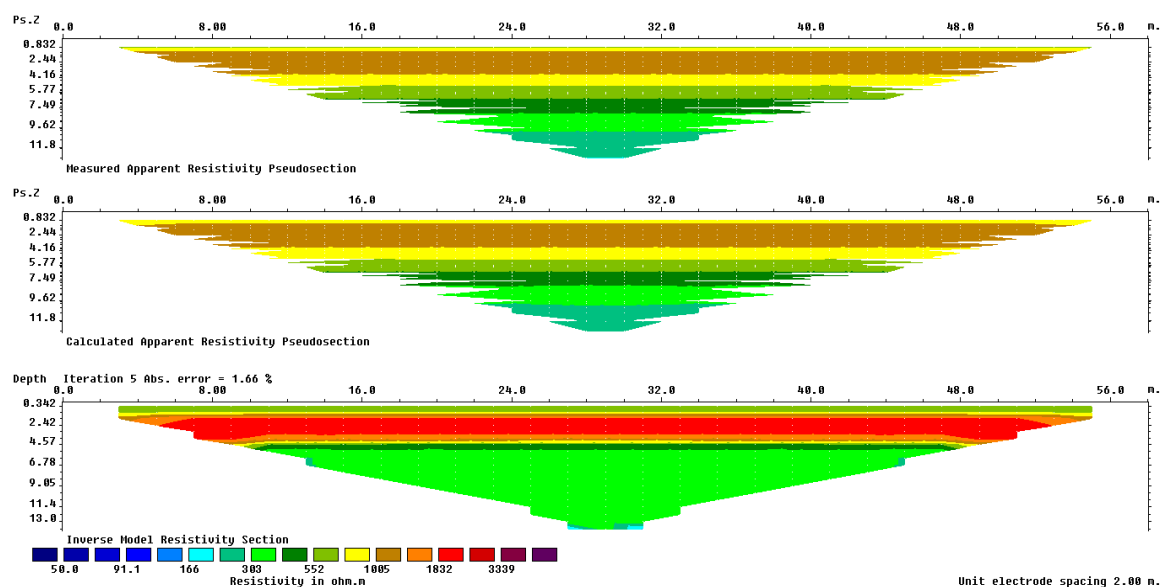
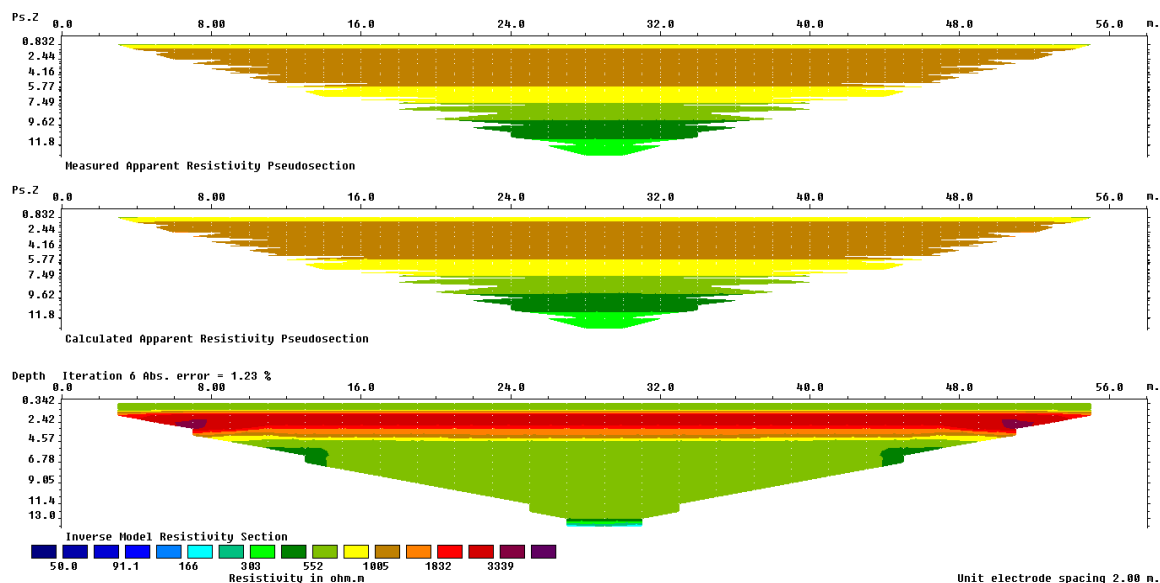
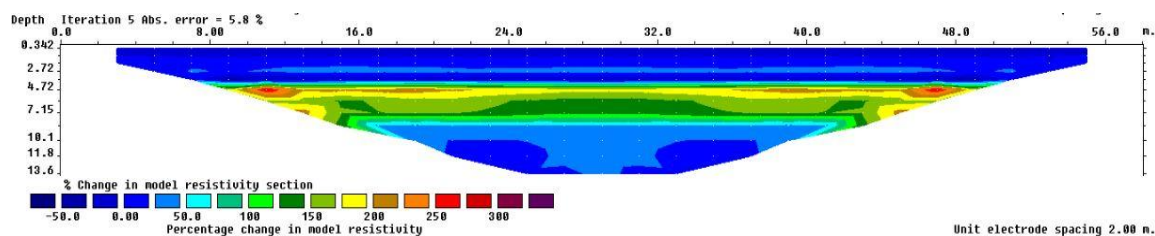


Figure 4.32: Pseudo-section, niveau 3m



**Figure 4.33: Pseudo-section, niveau 6m**



**Figure 4.34: Suivi temporel réalisé entre les niveaux 3m et 6m. Le modèle de référence est au niveau 3m.**

Il apparaît ainsi que le profil ERT EE' (figure 4.13) est plus influencé par les variations latérales que le profil FF' (figure 4.14). L'anomalie de résistivité électrique encerclée sur la figure 4.14 pourrait donc être liée au suintement ou à la variation de l'eau dans le réservoir vue que le profil est situé près du bord de l'eau.

## Chapitre 5 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Parmi les mécanismes qui génèrent la création d'un potentiel spontané dans le sol, l'effet d'électro-filtration a été mis à profit pour mettre en évidence l'écoulement de l'eau à la jonction de deux barrages en remblai, St-Timothée et Les Cèdres. Ces barrages d'une hauteur de 9m et 12m respectivement, ont été construits pendant des périodes différentes et sont principalement caractérisés par la construction des flancs en tout venant. La construction des structures avait nécessité une excavation de l'un des barrages au détriment de l'autre et favorisé la présence d'une zone de faiblesse à la jonction de deux structures. Des infiltrations d'eau ont persisté sur le site pendant une trentaine d'années environ, avec un débit total de fuite qui ne cessait de croître.

L'approche adoptée pour évaluer la sensibilité et la variation du potentiel spontané face à l'infiltration d'eau est le suivi temporel pendant les mesures. Ce suivi est réalisé avec un changement contrôlé du niveau de l'eau dans le réservoir principal pendant 4 jours lors de la vidange et de la mise en eau du réservoir du barrage St-Timothée. Avant l'acquisition des mesures, les tests effectués sur les électrodes et sur le site ont permis de rendre compte de la variation de l'erreur du voltage sur chacune des électrodes et de la variation spatiale et temporelle du potentiel total. Ces données sont prises en compte dans la représentation du potentiel total. Parallèlement aux mesures de polarisation spontanée, le suivi temporel de résistivité électrique par tomographie de résistivité électrique est utilisé pour contrôler la variation de la conductivité électrique des matériaux du barrage pendant le changement du niveau de l'eau.

Une similitude a été remarquée entre les variations de potentiel total pendant la vidange du réservoir et les mesures de débit de fuite. De ce résultat, une estimation du coefficient de couplage effectif des sols à partir de l'équation de Helmholtz-Smoluchowski a été déduite (valeurs comprises entre -4 et -14 mV/m). Néanmoins, pour pouvoir mettre en évidence le mécanisme d'électro-filtration parmi les sources variées de polarisation spontanée, on s'intéresse aux variations de potentiel par rapport à un potentiel de base pour diverses charges. La représentation de ce potentiel électrique a ainsi permis de proposer une sortie d'écoulement de l'eau en amont du barrage St-Timothée. Ceci indique un écoulement du réservoir amont du barrage Les Cèdres vers le réservoir St-Timothée. La cote du changement de l'écoulement telle



qu'indiquée par les interprétations de la méthode thermométrique et celles connues de la situation du site est difficile à quantifier. Les résultats sont tout aussi différents des attentes de la littérature et des résultats de la modélisation numérique réalisée du fait que le gradient du potentiel semble croître avec la diminution du gradient de pression dans le réservoir.

La modélisation numérique des profils de tomographie électrique a permis de quantifier l'effet des variations latérales causées par le changement du niveau de l'eau dans le réservoir. Ceci permet de mieux distinguer les différentes variations de résistivité observées dans les profils ERT et de rejeter celles dont la probabilité d'être causée par un mécanisme d'écoulement est minime.

À partir des résultats obtenus, des hypothèses ont été posées pour tenter d'interpréter les résultats de mesures. Nous avons ainsi émis l'hypothèse que le changement du potentiel est influencé par des variations possibles du potentiel à la position de l'électrode de référence ou par le signe positif du coefficient de couplage. Un autre scénario est proposé. Suivant ce dernier, l'écoulement de l'eau provient du barrage Les Cèdres vers le barrage St-Timothée ou il se crée la combinaison d'entrée et de sortie d'eau avec l'influence importante de la sortie d'eau sur la réponse P.S. Une meilleure connaissance géotechnique et l'évaluation du coefficient de couplage des sols en place sur le site permettraient donc de mieux contraindre la réponse numérique de polarisation et les interprétations.

Il serait ainsi intéressant de porter une attention:

- sur la quantification du coefficient de couplage électrocinétique
- sur la réalisation du suivi temporel des tomographies de résistivité électrique tout en tenant compte des effets latéraux (mesures et inversions 3D)
- sur l'acquisition de nouvelles mesures de polarisation spontanée avec une augmentation de la distribution spatiale des positions de mesure, dans le but de
  - (a) définir le potentiel de base
  - (b) étudier le changement effectif de la variation du potentiel spontané après injection du coulis et arrêt de l'écoulement dans la zone d'infiltration
  - (c) étudier l'impact causé par la position de l'électrode de référence.

On pourrait suggérer certains emplacements pour l'acquisition des mesures complémentaires :

- des mesures en continu sous l'eau permettraient une bonne résolution spatiale et la stabilité des électrodes.
- des mesures dans les bassins amont et aval permettraient de compléter les mesures actuelles afin de cartographier les sites de fuite.

Simultanément aux mesures de polarisation, des mesures de température à haute résolution permettraient d'augmenter le pouvoir diagnostique des mesures de polarisation.

## BIBLIOGRAPHIE

Abdelrahman E. S. M., *et* Sharafeldin S. M. (1997). *A least-squares approach to depth determination from self-potential anomalies caused by horizontal cylinders and spheres*. Geophysics, Vol. 62(1), pp 44-48.

Alonso E., Becue J.-P., Bolle G., Brodin J.-L., Brunel P., Cassard A., Degoutte G., Dore M., Lautrin D., Lafevre J., Michel G., Royet P., *et* Tratapel G. (2002). *Barrages en remblai*. In G. Degoutte (Ed.), *Petits barrages Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*. (Cemagref ed., 67-111): Comité Français Des Grands Barrages.

Al-Saigh N. H., Mohammed Z. S., *et* Dahham M. S. (1994). *Detection of water leakage from dams by self-potential method*. Engineering Geology, 37, pp 115-121.

Aubert M., *et* Atangana Q. Y. (1996). *Self-Potential Method in Hydrogeological Exploration of Volcanic Areas*. Ground Water, 34(6), pp 1010-1016.

Beddiar K., Berthaud Y., *et* Dupas A. (2002). *Vérification expérimentale de la relation de réciprocité d'Onsager pour l'électro-osmose et l'électro-filtration dans une argile naturelle*. C.R. Mécanique, 330, 893-888.

Berube A. P. (2007). *A graphical 3D finite element program for modelling self-potentials generated by flow through a porous medium*. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 12(2), pp 185-197.

Bolève A. (2010). *Suivi d'érosion interne d'une digue expérimentale en terre par monitoring de polarisation spontanée*. Paper presented at the Journées Scientifiques de Géophysique appliquée, AGAP.

Bolève A., Crespy A., Revil A., Janod F., *et* Mattiuzzo J. L. (2007). *Streaming potentials of granular media: Influence of the Dukhin and Reynolds numbers*. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 112.

Bolève A., Revil A., Janod F., Mattiuzzo J. L., *et* Jardani A. (2007). *Forward modeling and validation of a new formulation to compute self-potential signals associated with ground water flow*. Hydrology and Earth System Sciences, 11(5), pp 1661-1671.

Carlsten S., Johanson S., *et* Worman A. (1995). *Radar techniques for indicating internal erosion in embankment dams*. Journal of Applied Geophysics, 33, pp 143-156.

Cho I.-K., *et* Yeom J.-Y. (2007). *Crossline resistivity tomography for delineation of anomalous seepage pathways in an embankment dam*. Geophysics, Vol.72(2), G31-G38.

Côté A., Carrier B., Gervais R., Noël P., I Paquette L.-G. (2008). *Water seepage detection and localization at the Peribonka dam using optical fiber*. Paper presented at the CDA 2008 Annual Conference.

Dana I. N. (2006). *Contribution de la méthode de Polarisation Spontanée (PS) à la connaissance structurale et à la surveillance de quelques volcans indonésiens*. Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand).

David V. F. (1979). *Calculations of self-potential anomalies near vertical contacts*. Geophysics, 44(2), pp 195-205.

Domenico P. A., et Schwartz F. W. (1998). *Ground-Water Movement*. In I. John Wiley & Sons (Ed.), *Physical and chemical hydrogeology* (second ed., 33-56).

El-Sayed Mohamed A., et Sharafeldin Mahmoud S. (1997). *A least-squares approach to depth determination from self-potential anomalies caused by horizontal cylinders and spheres*. Geophysics, 62(1), pp 44-48.

Fauchard C., et Mériaux P. (2007). *Geophysical and geotechnical methods for diagnosing flood protection dikes*, Guide for implementation and interpretation

Fell R., et Fry J.-J. (2007). *The state of the art of assessing the likelihood of internal erosion of embankment dams, water retaining structures and their foundations*. In F. Fry (Ed.), *Internal erosion of Dams and their Foundations* (1-23). London: Taylor & Francis Group.

Fell R., Wan C. F., Cyganiewicz J., et Foster M. (2001). *The time for development and detectability of internal erosion and piping in embankment dams and their foundations*: UNICIV report No. R-399, ISBN: 85841 366 3, ISSN 0077-880X.

Fell R., Wan C. F., Cyganiewicz J., et Foster M. (2003). *Time for development of internal erosion and piping in embankment dams*. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 129(4), pp 307-314.

Fitterman D. V. (1979). *Calculations of self-potential anomalies near vertical contacts*. Geophysics, Vol. 44(2), pp 195-205.

Foster M., Fell R., et Spannagle M. (2000). *A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping*. Can. Geotech. J., 37, pp 1025-1061.

Foster M., Fell R., et Spannagle M. (2002). *A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping: Reply*. Can. Geotech. J., 39, pp 497-500.

Fragerlund F., et Heinsom G. (2003). *Detecting subsurface groundwater flow in fractured rock using self-potential (SP) methods*. Environmental Geology, 43, pp 782-794.

Ganesh M. (2006). *Monitoring of Tailings Dams with Geophysical Methods*. Unpublished PhD Thesis, Lulea University of Technology.

Giroux B., et Rivard P. (2007). *Détection des fuites d'eau du barrage St-Timothée par Polarisation Spontanée (Rapport d'activités 2007)*. Montréal: Polytechnique Montréal, Université de Sherbrooke.

Giroux B., et Rivard P. (2008). *Détection des fuites d'eau du barrage St-Timothée par P.S. (Rapport d'activités 2008)*. Montréal: Polytechnique Montréal, Université de Sherbrooke.

Giroux B., et Rivard P. (2008). *Mesures de la polarisation spontanée au barrage de St-Timothée (Rapport d'activités 2008)*. Montréal: Polytechnique Montréal, Université de Sherbrooke.

Gloaguen E. (2000). *Détermination des propriétés hydrogéologiques de l'aquifère de Lachenaie par géoradar et polarisation spontanée*. École polytechnique de Montréal, Montréal.

Haines B. M. (1978). *The detection of water leakage from dams using streaming potentials*. Paper presented at the SPWLA Nineteenth Annual Logging Symposium.

Hibbert D. B. (1993). *Introduction to electrochemistry* (Macmillan Press ed.). London: Palgrave Macmillan.

Ishido T., et Pritchett J. W. (1999). *Numerical simulation of electrokinetic potentials associated with subsurface fluid flow*. Journal of Geophysical Research, 104(B7), pp 15,247-215,259.

Johansson S. (1997). *Seepage Monitoring in Embankment Dams*. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Johansson S. (2004). *Detection of internal erosion in embankment dams-Possible methods in theory and practice*. Paper presented at the Proceedings - Stability and Breaching of Embankment Dams, EBL, Oslo.

Johansson S. (2007). *Detection of internal erosion in embankment dams using temperature, resistivity and SP measurements*. In F. Fry (Ed.), *Internal erosion of Dams and their Foundations* (133-149). London: Taylor & Francis Group.

Marche C. (2008). *Barrages, crues de rupture et protection civile*. In P. i. Polytechnique (Ed.), (2e édition ed., 5-31).

Massiéra M., Szostak-Chrzanowski A., Bazanowski M., Withaker C., et Vautour J. (2008). *Analyse des déformations de grands barrages en remblai pendant le remplissage et l'opération du réservoir*. Paper presented at the Congrès annuel 2008 de la SCGC.

Moore J. R. (2007). *Application of self-Potential Method in Hydrogeology*. University of California, Berkeley.

Naudet V. (2004). *Les Méthodes de résistivité électrique et de potentiel spontané appliquées aux sites contaminés*. Université Paul Cézanne.

Nzumotcha T. L. A., Chouteau M., Giroux B., Rivard P., Saleh K., et Côté A. (2010 a). *A case study of self-potential detection of seepage at the junction of two embankment dams*. SAGEEP 2010, 23, 118-125.

Nzumotcha T. L. A., Chouteau M., Giroux B., Rivard P., et Saleh K. (2010 b). *Mesures de la polarisation spontanée au barrage St-Timothée (Rapport d'activités 2008-2010)*. Montréal: Polytechnique Montréal.

Panthulu T. V., Krishnaiah C., et Shirke J. M. (2001). *Detection of seepage paths in earth dams using self-potential and electrical resistivity methods*. Engineering Geology, 59(3-4), pp 281-295.

Revil A., et Leroy P. (2004). *Constitutive equations for ionic transport in porous shales*. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 109(B3).

Revil A., leroy P., et Titov K. (2005). *Characterization of transport properties of argillaceous sediments. Application to the Callovo-Oxfordian Argillite*. Journal of Geophysical Research, 110(B06202).

Revil A., Linde N., Cerepi A., Jougnot D., Matthai S., et Finsterle S. (2007). *Electrokinetic coupling in unsaturated porous media*. Journal of Colloid and Interface Science, 313(1), pp 315-327.

Revil A., Pezard P. A., et Glover P. W. J. (1999 a). *Streaming potential in porous media 1. Theory of the zeta potential*. Journal of Geophysical Research, 104(B9), 20,021-020,031.

Revil A., Schwaeger H., Cathles III L. M., et Manhardt P. D. (1999 b). *Streaming potential in porous media 2: Theory and application to geothermal systems*. Journal of Geophysical Research, 104(B9), pp 20033-20048.

Revil A., Titov K., Doussan C., et Lapenna V. (2006). *Applications of the self-potential method to hydrological problems*. H. Vereecken et al. (eds.), Applied Hydrogeophysics, pp 255-292.

Reynolds J. M. (1997). *Electrical Methods*. In Wiley (Ed.), *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (491-521).

Roy A., et Chowdhury D. K. (1959). *Interpretation of self-potential data for tabular bodies*. J. Science and Engineering Res., Vol. 3, pp 35-54.

Rozycki A. (2009). *Evaluation of the streaming potential effect of piping phenomena using a finite cylinder model*. Engineering Geology, 104, pp 98-108.

Rozycki A., Fonticiella J. M. R., et Cuadra A. (2006). *Detection and evaluation of horizontal fractures in earth dams using the self-potential method*. Engineering Geology, 82(3), pp 145-153.

Saleh K., Côté A., et Smith M. (2007). *Application des méthodes non-destructives pour la localisation des infiltrations d'eau dans les ouvrages en remblai et les fondations (Rapport IREQ)*. Varennes, Qc: Hydro-Québec.

Salmon G. M., et Johansson S. (2003). *Research on Geophysical Methods of detecting Seepage and Piping in Embankment Dams with case studies of Geophysical Measurements at two swedish Tailings dams*. Paper presented at the Challenges in Tailing dams, Montreal.

Sasitharan S., Sheffer M. R., et Gaffran P. G. (2001). *An Investigation of Streaming Potential and its Application to Earthfill Dams*. Paper presented at the Canadian Dam Association Annual Conference.

Seed H. B., et Duncan J. M. (1987). *The failure of TETON Dam*. Engineering Geology, 24(1-4), pp 173-205.

Sharma P. V. (1997). *Self-potential surveying*. In C. U. Press (Ed.), Environmental and engineering geophysics (190).

Sheffer M. R. (2002). *Response of the Self-Potential Method to changing seepage conditions in embankment dams*. The University of British Columbia, Vancouver.

Sheffer M. R. (2007). *Forward Modeling and Inversion of Streaming Potential for the interpretation of the hydraulic conditions from self-potential data*. University of British Columbia, Vancouver.

Sheffer M. R., et Howie J. A. (2003). *A numerical modelling procedure for the study of the streaming potential phenomenon in embankment dams*. SAGEEP, 16, pp 475-487.

Sheffer M. R., et Oldenburg D. W. (2007). *Three-dimensional modelling of streaming potential*. Geophysical Journal International, 169(3), pp 839-848.

Sill R. (1983). *Self-Potential modeling from primary flows*. Geophysics, 48(1), pp 76-86.

Singh V. P., Scarlatos P. D., Collins J. G., et Jourdan M. (1988). *Breach Erosion of Earthfill Dams (BEED) Model*. Natural Hazards, 1, pp 161-180.

Sjödahl P., Dahlin T., Johansson S., et Loke M. H. (2008). *Resistivity monitoring for leakage and internal erosion detection at Hällby embankment dam*. Journal of Applied Geophysics, 65(3-4), pp 155-164.

Smalley I. J., et Dijkstra T. A. (1991). *The Teton Dam (Idaho, U.S.A.) failure: problems with the use of loess material in earth dam structures*. Engineering Geology, 31(2), 197-203.

Smith M. (2008). *Summary, Les Cedres and St-Timothee dams*. Montreal: Hydro-Quebec.

Smith M., Côté A., Noël P., et Babin D. (2009). *Characterizing seepage at the junction of two embankment dams*. Paper presented at the Canadian Dam Association. from <http://www.cda.ca/proceedings%20datafiles/2009/2009-9b-01.pdf>

Solava, et Delatte. (2003). *Lessons from the failure of the Teton Dam*. Paper presented at the Proceedings of the 3rd ASCE Forensics Congress, October 19-21, San Diego, California.

Suski B. (2005). *Caractérisation et suivi des écoulements hydriques dans les milieux poreux par la méthode du Potentiel Spontané*, Université Paul Cézanne, Aix-Marseille III.

Suski B., Ladner F., Baron L., Vuataz F. D., Philipposian F., et Holliger K. (2008). *Detection and characterization of hydraulically active fractures in a carbonate aquifer: results from self-potential, temperature and fluid electrical conductivity logging in the Combioula hydrothermal system in the southwestern Swiss Alps*. Hydrogeology Journal, 16, pp 1319-1328.

Suski B., Ladner F., Baron L., Vuataz F. D., Philipposian F., et Holliger K. (2008). *Detection and characterization of hydraulically active fractures in a carbonate aquifer: results from self-potential, temperature and fluid electrical conductivity logging in the Combioula hydrothermal system in the southwestern Swiss Alps*. Hydrogeology Journal, 16, pp 1319-1328.

Telford W. M., Geldart L. P., et Sheriff R. E. (1990). *Methods Employing Natural Electrical Sources*. In C. U. Press (Ed.), Applied Geophysics Second edition (pp 293-302). New York Melbourne: Press Syndicate of the university of Cambridge.

Vichabian Y., et Morgan F. D. (2002). *Self potentials in cave detection*. The Leading Edge, 21(9), pp 866-871.

William R. S. (1983). *Self-potential modeling from primary flows*. Geophysics, 48(1), pp 76-86.

Wilt M. J., et Corwin R. F. (1989). *Numerical Modelling of self-potential anomalies due to leaky dams: Model and fields examples*. in lecture notes in Earth Sciences, Vol.27, Merkler, G-P, Militzer, H., Hoetzel, H., Armbruster, H., and Brauns, J. (eds), Springer-verlag, Berlin, pp 73-89.

Wurmstich B., et Morgan F. D. (1994). *Modeling of streaming potential responses caused by oil-well pumping*. Geophysics, 59(1), pp 46-56.

Wurmstich B., Morgan F. D., Merkler G.-P., et Lytton R. L. (1991). *Finite-Element Modeling of Streaming Potentials Due to Seepage: Study of a Dam*. Society of Exploration Geophysicists. Technical Program Expanded Abstracts, 10, pp 542-544.



## ANNEXES

### ANNEXE 1 : Valeurs de conductivité hydrauliques associées pour différents types de sols (Domenico et Schwartz, 1998)

**Table 3.2 Representative Values of Hydraulic Conductivity for Various Rock Types**

Material	Hydraulic Conductivity (m/s)
<b>SEDIMENTARY</b>	
Gravel	$3 \times 10^{-4}$ – $3 \times 10^{-2}$
Coarse sand	$9 \times 10^{-7}$ – $6 \times 10^{-3}$
Medium sand	$9 \times 10^{-7}$ – $5 \times 10^{-4}$
Fine sand	$2 \times 10^{-7}$ – $2 \times 10^{-4}$
Silt, loess	$1 \times 10^{-9}$ – $2 \times 10^{-5}$
Till	$1 \times 10^{-12}$ – $2 \times 10^{-6}$
Clay	$1 \times 10^{-11}$ – $4.7 \times 10^{-9}$
Unweathered marine clay	$8 \times 10^{-13}$ – $2 \times 10^{-9}$
<b>SEDIMENTARY ROCKS</b>	
Karst and reef limestone	$1 \times 10^{-6}$ – $2 \times 10^{-2}$
Limestone, dolomite	$1 \times 10^{-9}$ – $6 \times 10^{-6}$
Sandstone	$3 \times 10^{-10}$ – $6 \times 10^{-6}$
Siltstone	$1 \times 10^{-11}$ – $1.4 \times 10^{-8}$
Salt	$1 \times 10^{-12}$ – $1 \times 10^{-10}$
Anhydrite	$4 \times 10^{-13}$ – $2 \times 10^{-8}$
Shale	$1 \times 10^{-13}$ – $2 \times 10^{-9}$
<b>CRYSTALLINE ROCKS</b>	
Permeable basalt	$4 \times 10^{-7}$ – $2 \times 10^{-2}$
Fractured igneous and metamorphic rock	$8 \times 10^{-9}$ – $3 \times 10^{-4}$
Weathered granite	$3.3 \times 10^{-6}$ – $5.2 \times 10^{-5}$
Weathered gabbro	$5.5 \times 10^{-7}$ – $3.8 \times 10^{-6}$
Basalt	$2 \times 10^{-11}$ – $4.2 \times 10^{-7}$
Unfractured igneous and metamorphic rocks	$3 \times 10^{-14}$ – $2 \times 10^{-10}$
<b>To convert meters per second to</b>	
	<b>Multiply by</b>
cm/s	$10^2$
(gal/day)/ft <sup>2</sup>	$2.12 \times 10^6$
ft/s	3.28
ft/yr	$1 \times 10^8$
darcy	$1.04 \times 10^5$
ft <sup>2</sup>	$1.1 \times 10^{-6}$
cm <sup>2</sup>	$1 \times 10^{-3}$
To convert any of the above to meters per second	→ Divide by the appropriate number above

**ANNEXE 2 :** Programme pour générer un fichier de données Res2DInv à partir des données Res3DInv : Programme écrit par Bernard Giroux.

```

#! C:\Perl64\bin\perl
#
#
# Script Perl pour générer un fichier de données res2dinv à partir
# d'un fichier de données res3dinv (produit avec res3dmod).
#
# Une version de Perl/Tk (www.perl.com) doit être installée au
# préalable
# pour que ce programme fonctionne. Une excellente distribution de
# Perl
# pour windows peut être téléchargée du site de ActiveState:
#   http://www.activestate.com/Products/ActivePerl/
#
# Pour le moment, ce programme fonctionne pour les configurations
# d'électrode suivantes:
#           -> Dipôle-dipôle
#           -> Wenner (alpha)
#           -> Schlumberger
#
# -----
#
# Bernard Giroux
# École Polytechnique
# 28 Mai 2003
#
# -----
#
# Ce programme est mis à la disposition du public sous les termes de
# la license GNU GPL (http://www.gnu.org/licenses/gpl.html)
#
use Tk;
use Tk::Dialog;

my $titre = "";
my $nData3D = 0;
my $nx = 0;
my $ny = 0;
my $dx = 0;
my $dy = 0;
my $type = 0;
my @NomsTypes = qw( ""
                    Wenner_(alpha)

```

```

                                Pole-Pole
                                Dipole-dipole
                                Wenner_(beta)
                                Wenner_(gamma)
                                Pole-dipole
                                Schlumberger
                                Equatorial_dipole-dipole
                                General
                                Cross-borehole_(apparent_resistivity)
                                Cross-borehole_(resistance)
                                );
my $IPpresent = 0;
my $IPnomParam = "";
my $IPunites = "";
my @IPdelai = {0, 0};
my @C1x;
my @C1y;
my @C2x;
my @C2y;
my @P1x;
my @P1y;
my @P2x;
my @P2y;
my @rho_a;
my @IPdata;
my @indices2D;

my $direction2D = "x";
my $position2D = 0;
my $fichier2D = "";
my $gardePP = 1;

# -----

my $fichierDataIn = "C:\Users\Armelle\Desktop\exampe\Profil2_inv.INV";
if ( defined @ARGV ) {
    $fichierDataIn = $ARGV[0];
    chomp($fichierDataIn);
    lisFichier();
}

my $mw = MainWindow->new();
$mw->configure(-title=>'Conversion res3dinv a res2dinv');
my $body = $mw->Frame()->pack(-side=>'top', -fill=>'x');

# -----

```

```
# Frame - Opérations
```

```
# -----
```

```
my $Op_f = $body->Frame(-relief=>'sunken',
                        -borderwidth=>2)
->pack(-side=>'right',
      -padx=>5,
      -pady=>5,
      -anchor=>'n');
my $Op_lm = $Op_f->Button(-text=>'Lecture du fichier res3dinv',
                        -borderwidth=>1,
                        -command=>\&lis3D)
->pack(-fill=>'x',
      -padx=>3,
      -pady=>2);
my $Op_sauve = $Op_f->Button(-text=>'Sauvegarde du fichier res2dinv',
                        -borderwidth=>1,
                        -command=>\&sauve2D)
->pack(-fill=>'x',
      -padx=>3,
      -pady=>2);
my $Op_quit = $Op_f->Button(-text=>'Quitter',
                        -borderwidth=>1,
                        -command=>sub{ exit(0)})
->pack(-fill=>'x',
      -padx=>3,
      -pady=>2,
      -ipady=>5);
```

```
# -----
```

```
# Frame - Param 2D
```

```
# -----
```

```
my $mf1 = $body->Frame(-relief=>'ridge',
                    -borderwidth=>2)
->pack(-side=>'right',
      -padx=>5,
      -pady=>5,
      -ipadx=>1,
      -ipady=>1,
      -anchor=>'n');

my $Param2d_f = $mf1->Frame(-relief=>'groove',
                        -borderwidth=>3,
                        -label=>"Parametres du profil 2D")
->pack(-side=>'top',
```

```

-padx=>5,
-pady=>5,
-ipadx=>3,
-ipady=>3,
-anchor=>'n');
my $direction_f = $Param2d_f->Frame(-relief=>'ridge',
                                   -borderwidth=>1,
                                   -label=>'Direction')

->pack(-fill=>'x',
      -padx=>3,
      -pady=>2);
my @direction_b;
$direction_b[0] = $direction_f->Radiobutton(-text=>"x",
      -value=>"x",
      -variable=>\$direction2D)

->pack(-side=>'left',
      -expand=>1);
$direction_b[1] = $direction_f->Radiobutton(-text=>"y",
      -value=>"y",
      -variable=>\$direction2D)

->pack(-side=>'left',
      -expand=>1);
$direction_b[0]->select;
my $position_f = $Param2d_f->Frame(-relief=>'ridge',
                                   -borderwidth=>1)

->pack(-fill=>'x',
      -padx=>3,
      -pady=>2);

my $position_l = $position_f->Label(-text=>'Position')
->pack(-side=>'left');
my $position_e = $position_f->Entry(-textvariable=>\$position2D,
      -width=>'10',
      -validate=>'focusout')

->pack(-side=>'right');
my $gardeIP = $Param2d_f->Checkbutton(-text=>'Inclure les données PP',
      -variable=>\$gardePP)

->pack(-fill=>'x',
      -padx=>3,
      -pady=>2);

# -----
# Frame - Info donnés 3D
# -----

```

```

my $mf2 = $body->Frame(-relief=>'ridge',
                      -borderwidth=>2)
->pack(-side=>'right',
      -padx=>5,
      -pady=>5,
      -ipadx=>1,
      -ipady=>1,
      -anchor=>'n');

my $Lim_f = $mf2->Frame(-relief=>'groove',
                      -borderwidth=>3)
->pack(-side=>'top',
      -padx=>5,
      -pady=>5,
      -ipadx=>3,
      -ipady=>3,
      -anchor=>'n');
my $Lim_titre = $Lim_f->Label(-text=>"Info fichier 3D\n($fichierDataIn)")
->pack();
my $nNoeuds_1 = $Lim_f->Label(-text=>"nx = $nx, ny = $ny",
                             -font=>'Helvetica -12 normal')
->pack();
my $secart_1 = $Lim_f->Label(-text=>"dx = $dx, dy = $dy",
                             -font=>'Helvetica -12 normal')
->pack();
my $type_1 = $Lim_f->Label(-text=>"Configuration $NomsTypes[$type]",
                             -font=>'Helvetica -12 normal')
->pack();
my $nData3D_1 = $Lim_f->Label(-text=>"Nombre de mesures= $nData3D",
                             -font=>'Helvetica -12 normal')
->pack();

my $IPlabel = "absentes";
$IPlabel = $IPnomParam if ( $IPpresent );
my $IP_f = $Lim_f->Label(-text=>"Données PP: $IPlabel",
                        -font=>'Helvetica -12 normal')
->pack();

# -----

my $fail_dialog = $mw->Dialog(-title => "Erreur de l'interpréteur Perl/Tk",
                             -default_button => "OK", # -wraplength => '5i',
                             -text => "L'opération a échoué");

# -----

```

```

updateInfo3D();

MainLoop();

# -----
# -----
# Routines
# -----
# -----

# -----
# lis3D
# -----

sub lis3D {

    my $types = [
        ['Fichier res3dinv', '.dat', 'TEXT'],
        ['Tous', '*', ],
    ];

    my $filename = $mw->getOpenFile(-filetypes=>$types);
    return unless defined $filename;
    return $fail_dialog->Show() if $filename eq "" or (! -f $filename);
    $fichierDataIn = $filename;
    lisFichier();
    updateInfo3D();
}

# -----
# lisFichier
# -----

sub lisFichier {
    open FILE, $fichierDataIn
        or die "Impossible d'ouvrir $fichierDataIn\n";
    my $ligne = <FILE>;
    chomp $ligne;
    $titre = $ligne;
    $ligne = <FILE>; chomp $ligne;
    my @tmp = split ',', $ligne;
    $nx = sprintf "%d", $tmp[0];
    if ( $#tmp == 0 ) {
        $ligne = <FILE>; chomp $ligne;
        my @tmp = split ',', $ligne;
        $ny = sprintf "%d", $tmp[0];
    }
}

```

```

}
$ligne = <FILE>; chomp $ligne;
@tmp = split ',', $ligne;
$dx = sprintf "%d", $tmp[0];
if ( $#tmp == 0 ) {
    $ligne = <FILE>; chomp $ligne;
    my @tmp = split ',', $ligne;
    $dy = sprintf "%d", $tmp[0];
}

$ligne = <FILE>; chomp $ligne;
$type = sprintf "%d", $ligne;
$ligne = <FILE>; chomp $ligne;
$nData3D = sprintf "%d", $ligne;
$ligne = <FILE>;
my $nvaleurs = 8;
if ( $ligne =~ /IP present/ ) {
    $IPpresent = 1;
    $ligne = <FILE>; chomp $ligne;
    $IPnomParam = $ligne;
    $ligne = <FILE>; chomp $ligne;
    $IPunites = $ligne;
    $ligne = <FILE>; chomp $ligne;
    @IPdelai = split ',', $ligne;
    $ligne = <FILE>;
    $nvaleurs = $nvaleurs + 1;
}
@C1x = (); @C1y = (); @C2x = (); @C2y = ();
@P1x = (); @P1y = (); @P2x = (); @P2y = ();
@rho_a = (); @IPdata = ();
{ do {
    chomp $ligne;
    @tmp = split ' ', $ligne;
    last if ( $#tmp != $nvaleurs );
    push @C1x, $tmp[0];
    push @C1y, $tmp[1];
    push @C2x, $tmp[2];
    push @C2y, $tmp[3];
    push @P1x, $tmp[4];
    push @P1y, $tmp[5];
    push @P2x, $tmp[6];
    push @P2y, $tmp[7];
    push @rho_a, $tmp[8];
    push @IPdata, $tmp[9] if ( $IPpresent );
} while ( $ligne = <FILE> ); }

```



```

close FILE;
}

# -----
# updateInfo3D
# -----

sub updateInfo3D {

$Lim_titre->configure(-text=>"Info fichier 3D\n($fichierDataIn)");
$nNoeuds_1->configure(-text=>"nx = $nx, ny = $ny");
$ecart_1->configure(-text=>"dx = $dx, dy = $dy");
$type_1->configure(-text=>"Configuration $NomsTypes[$type]");
$nData3D_1->configure(-text=>"nombre de mesures = $nData3D");
$Ilabel = "absentes";
$Ilabel = $IPnomParam if ( $IPpresent == 1 );
$IP_f->configure(-text=>"Données PP: $Ilabel");
}

# -----
# sauve2D
# -----

sub sauve2D {

my $types = [
    ['Fichier res2dinv', '.dat', 'TEXT'],
    ['Tous', '*', ],
];
$fichier2D = $mw->getSaveFile(-filetypes=>$types,
                             -defaulttextension=>".dat");
return unless defined $fichier2D;

getIndices2D();
$IPpresent = 0 if ( $gardePP == 0 );
if ( $type == 1 ) {
    sauveWenner();
} elsif ( $type == 3 ) {
    sauveDipoleDipole();
} elsif ( $type == 7 ) {
    sauveSchlum();
} else {
    print "\n\nConfiguration $NomsTypes[$type] non disponible.\n\n";
}
}

```

```

}

# -----
# sauveWenner
# -----

sub sauveWenner {

    open FILE, "> $fichier2D"
    or die "Impossible d'ouvrir le fichier $fichier2D en écriture.\n";

    print FILE "$titre\n";
    printf FILE "%f\n", ($dx <= $dy ? $dx : $dy);
    print FILE "$type\n";
    print FILE ($#indices2D + 1)."\n";
    print FILE "0\n";
    print FILE "$IPpresent\n";
    print FILE "$IPnomParam\n" if ( $IPpresent );
    print FILE "$IPunités\n" if ( $IPpresent );
    print FILE "$IPdelai[0],$IPdelai[1]\n" if ( $IPpresent );
    my $i;
    my $tmp;
    if ( $direction2D eq "x" ) {
        foreach $i ( @indices2D ) {
            $tmp = sprintf "%5.2f %5.1f %f", $C1x[$i], $P1x[$i]-$C1x[$i],
                $rho_a[$i];
            $tmp = $tmp." $IPdata[$i]" if ( $IPpresent );
            printf FILE "$tmp\n";
        }
    } else {
        # y
        foreach $i ( @indices2D ) {
            $tmp = sprintf "%5.2f %5.1f %f", $C1y[$i], $P1y[$i]-$C1y[$i],
                $rho_a[$i];
            $tmp = $tmp." $IPdata[$i]" if ( $IPpresent );
            printf FILE "$tmp\n";
        }
    }
    close FILE;
}

# -----
# sauveDipoleDipole
# -----

sub sauveDipoleDipole {

```

```

open FILE, "> $fichier2D"
  or die "Impossible d'ouvrir le fichier $fichier2D en écriture.\n";
print FILE "$titre\n";
printf FILE "%f\n", ($dx <= $dy ? $dx : $dy);
print FILE "$type\n";
print FILE ($#indices2D + 1)."\n";
print FILE "0\n";
print FILE "$IPpresent\n";
print FILE "$IPnomParam\n" if ( $IPpresent );
print FILE "$IPunités\n" if ( $IPpresent );
print FILE "$IPdelai[0],$IPdelai[1]\n" if ( $IPpresent );
my $i;
my $tmp;
if ( $direction2D eq "x" ) {
  foreach $i ( @indices2D ) {
    $tmp = sprintf "%5.2f %5.1f %f %f", $C2x[$i], $C1x[$i]-$C2x[$i],
      ($P1x[$i]-$C1x[$i])/($C1x[$i]-$C2x[$i]), $rho_a[$i];
    $tmp = $tmp." $IPdata[$i]" if ( $IPpresent );
    printf FILE "$tmp\n";
  }
} else {
  # y
  foreach $i ( @indices2D ) {
    $tmp = sprintf "%5.2f %5.1f %f %f", $C2y[$i], $C1y[$i]-$C2y[$i],
      ($P1y[$i]-$C1y[$i])/($C1y[$i]-$C2y[$i]), $rho_a[$i];
    $tmp = $tmp." $IPdata[$i]" if ( $IPpresent );
    printf FILE "$tmp\n";
  }
}
close FILE;
}

```

```

# -----
# sauveSchlum
# -----

```

```

sub sauveSchlum {

```

```

  open FILE, "> $fichier2D"
    or die "Impossible d'ouvrir le fichier $fichier2D en écriture.\n";
  print FILE "$titre\n";
  printf FILE "%f\n", ($dx <= $dy ? $dx : $dy);
  print FILE "$type\n";
  print FILE ($#indices2D + 1)."\n";
  print FILE "0\n";
  print FILE "$IPpresent\n";
  print FILE "$IPnomParam\n" if ( $IPpresent );

```

```

print FILE "$IPunites\n" if ( $IPpresent );
print FILE "$IPdelai[0],$IPdelai[1]\n" if ( $IPpresent );
my $i;
my $tmp;
if ( $direction2D eq "x" ) {
    foreach $i ( @indices2D ) {
        $tmp = sprintf "%5.2f %5.1f %f %f", $C1x[$i], $P2x[$i]-$P1x[$i],
            ($P1x[$i]-$C1x[$i])/($P2x[$i]-$P1x[$i]), $rho_a[$i];
        $tmp = $tmp." $IPdata[$i]" if ( $IPpresent );
        printf FILE "$tmp\n";
    }
} else {
    # y
    foreach $i ( @indices2D ) {
        $tmp = sprintf "%5.2f %5.1f %f %f", $C1y[$i], $P2y[$i]-$P1y[$i],
            ($P1y[$i]-$C1y[$i])/($P2y[$i]-$P1y[$i]), $rho_a[$i];
        $tmp = $tmp." $IPdata[$i]" if ( $IPpresent );
        printf FILE "$tmp\n";
    }
}
close FILE;
}

# -----
# getIndices2D
# -----

sub getIndices2D {

    my $i;
    @indices2D = ();
    if ( $direction2D eq "x" ) {
        for ( $i=0; $i<$nData3D; $i++ ) {
            if ( $position2D == $C1y[$i] && $position2D == $C2y[$i] &&
                $position2D == $P1y[$i] && $position2D == $P2y[$i] ) {
                push @indices2D, $i;
            }
        }
    } else {
        # y
        for ( $i=0; $i<$nData3D; $i++ ) {
            if ( $position2D == $C1x[$i] && $position2D == $C2x[$i] &&
                $position2D == $P1x[$i] && $position2D == $P2x[$i] ) {
                push @indices2D, $i;
            }
        }
    }
}

```